



Universidad
Tecnológica
del Perú

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Industrial

Trabajo de Investigación

**“Reducción de costos energéticos
simulando un sistema piezoeléctrico, para la
UTP – Sede Arequipa”**

Leslie Lucianita Benavente Palle

Para optar el Grado Académico de Bachiller en:

Ingeniería Industrial

Arequipa – Perú

Agosto, 2020

RESUMEN

Con el paso de los años ha habido un incremento de la demanda de energía eléctrica y como consecuencia de esta, la contaminación ambiental; lo cual ha generado investigación sobre diversas alternativas de generación eléctrica amigables con el medio ambiente.

En el presente trabajo se busca mostrar que la tecnología Energy Harvesting mediante sistemas piezoeléctricos puede ser capaz de convertirse en una fuente viable y eficaz de generación de energía renovable y limpia, brindando nuevas alternativas con sus aplicaciones. Posteriormente, se simula un sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus que es capaz de generar energía eléctrica aprovechando la energía mecánica de las pisadas en lugares con alto flujo de personas dentro de la UTP – sede Arequipa.

Para ello, se diseña un sistema piezoeléctrico para obtención de energía, luego se simula éste en el software Proteus y por último se realiza una evaluación de costo beneficio.

En consecuencia, este trabajo se estructuró de la siguiente manera: primeramente, se realiza el planteamiento del problema, justificación, objetivo general y específicos, alcances y limitaciones; seguidamente se plantea la fundamentación teórica en base a fuentes confiables; luego se realiza el estado de arte, metodología, operacionalización de variables y desarrollo de la metodología con sus referencias bibliográficas debidamente colocadas. Finalmente se colocan las conclusiones obtenidas en relación a los objetivos planteados con énfasis en la reducción de costos energéticos los cuales resultaron en un 3.65% considerando el peor escenario.

Palabras clave: Piezoeléctrico, simulación, software Proteus

ABSTRACT

Over the years there has been an increase in the demand for electrical energy and as a consequence of this, environmental pollution; which has generated research on various environmentally friendly electricity generation alternatives.

The present work seeks to show that Energy Harvesting technology through piezoelectric systems may be able to become a viable and effective source of renewable and clean energy generation, offering new alternatives with its applications. Subsequently, a piezoelectric system is simulated using the Proteus software that is capable of generating electrical energy by taking advantage of the mechanical energy of the footsteps in places with a high flow of people within the UTP - Arequipa headquarters.

To do this, a piezoelectric system is designed to obtain energy, then it is simulated in the Proteus software and finally a cost-benefit evaluation is performed.

Consequently, this work was structured as follows: first, the problem statement, justification, general and specific objective, scope and limitations are carried out; then the theoretical foundation is proposed based on reliable sources; then the state of the art, methodology, operationalization of variables and development of the methodology are carried out with their bibliographic references properly placed. Finally, the conclusions obtained in relation to the objectives set are placed with emphasis on the reduction of energy costs, which resulted in 3.65% considering the worst scenario.

Keywords: Piezoelectric, simulation, Proteus software

DEDICATORIA

A dios que en todo momento guía mi camino. A mis padres, pilares fundamentales en mi vida, les dedico mi esfuerzo en reconocimiento a los sacrificios que realizaron para que yo pueda estudiar, se merecen esto y mucho más. A mi gran amor por ser mi compañero inseparable de cada día. A la luz que Dios me dio mi hija. A todos ustedes ya que con su dedicación y palabras de aliento siempre me apoyaron aun cuando todo parecía complicarse.

A todos ustedes con afecto y amor.

AGRADECIMIENTOS

A dios porque sin el nada hubiera podido ser posible. Un agradecimiento especial a mis padres Carol y Alfonso, que nunca dejaron de apoyarme hasta en la cosa más motivando mi formación académica con tenacidad y perseverancia; gracias por todo su amor y apoyo incondicional.

A mi compañero de vida e hija por sus palabras de aliento y amor infinito.

Finalmente, pero no menos importante a mis profesores que marcaron con sus enseñanzas el futuro de todos nosotros e impartieron sus conocimientos.

A todos ustedes un agradecimiento de todo corazón.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO 1	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos	3
1.4 Alcances y Limitaciones	4
CAPÍTULO 2	5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1 Energy Harvesting (Cosecha de Energía)	5
2.2 Dispositivo Piezoeléctrico	6
2.3 Efecto piezoeléctrico	7
2.4 Tipos de materiales Piezoeléctricos.....	7
2.5 Formas de captación de energía	9
2.6 Diseño general del sistema piezoeléctrico	11
2.7 Baldosa piezoeléctrica PAVEGEN	12
2.8 Software PROTEUS	13
CAPÍTULO 3	17
ESTADO DEL ARTE	17
CAPÍTULO 4	21
4.1 Metodología de la investigación	21
4.2. Diseño de la investigación	22
4.3. Operacionalización de variables.....	24

4.3.1. Variable dependiente	24
4.3.2. Variable independiente	24
CAPÍTULO 5	26
DISEÑO DEL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS ENERGÉTICOS EN LA UTP – SEDE AREQUIPA	26
5.1. Diseño del sistema piezoeléctrico	26
5.2. Componentes del Sistema piezoeléctrico	28
CAPÍTULO 6	38
SIMULACIÓN DEL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO MEDIANTE EL SOFTWARE PROTEUS	38
6.1. Establecer valores necesarios para simulación en Proteus	38
6.1.1. Promedio del peso de las personas	39
6.1.2. Energía potencial por pisada	39
6.2. Simular el sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus	41
CAPÍTULO 7	49
EVALUACIÓN COSTO – BENEFICIO SOBRE EL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO	49
7.1. Caracterización energética de consumo y costos	49
7.2. Realizar una comparativa con empresa Pavegen	58
7.3. Evaluación costo - beneficio de implementación del sistema piezoeléctrico	59
CONCLUSIONES	66
8.1. Conclusiones	66
8.2. Discusión	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema general de un sistema Energy Harvesting.	6
Figura 2: Efecto piezoeléctrico directo.	7
Figura 3: Modelo tapa de radiador.	10
Figura 4: Modelo estructura Cantilever.	10
Figura 5: Modelo rueda dentada.	11
Figura 6: Sistema piezoeléctrico.	11
Figura 7: Tipos de baldosas piezoeléctricas PAVEGEN.	13
Figura 8: Voltímetro en software Proteus.	16
Figura 9: Vatímetro en software Proteus	16
Figura 10: Sistema piezoeléctrico.	27
Figura 11: Material piezoeléctrico.	30
Figura 12: Tolerancias mecánicas de piezoeléctricos de Channel Industries INC.	30
Figura 13: Distribución de piezoeléctricos en baldosa.	32
Figura 14: Puente de diodos.	34
Figura 15: Módulo EH 301.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17: Circuito electrónico con 4 integrados LTC 3588-1, sensor de foto resistencia, batería y LED.	41
Figura 18: Circuito cuádruplicador de voltaje.	42
Figura 19: Circuito multiplicador de voltaje.	43
Figura 20: Circuito del sistema piezoeléctrico en Proteus.	45

Figura 21: Potencia generada por pisada en circuito piezoeléctrico simulado.	46
Figura 22: Energía generada por el circuito del sistema piezoeléctrico simulado.	46
Figura 23: Circuito completo del sistema piezoeléctrico simulado en Proteus.	47
Figura 24: Evaluación de cantidad de energía teórica generada considerando 8, 12 y 16 pasos por persona considerando un flujo de 9336 personas al día.	50
Figura 25: Energía producida a partir de 3 escenarios según turno mañana, tarde y noche.	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características de los materiales usados como piezoeléctrico.	9
Tabla 2: Actividades en relación a los objetivos.	24
Tabla 3: Operacionalización de variables.	25
Tabla 4: Matriz de selección de material para baldosa.	29
Tabla 5: Dimensiones piezoeléctrico PZT 5500.	31
Tabla 6: Características del piezoeléctrico PZT 5500.	31
Tabla 7: Evaluación de capacitores.	35
Tabla 8: Evaluación de diodos.	33
Tabla 9: Evaluación de baterías según material. Fuente: [28]	36

Tabla 10: Número de estudiantes por facultad de pregrado de la UTP Arequipa - 2018	38
Tabla 11: Elementos del circuito del sistema piezoeléctrico.	44
Tabla 12: Energía producida con simulador Proteus con 8 pasos.	52
Tabla 13: Energía producida con simulador Proteus con 12 pasos.....	53
Tabla 14:Energía producida con simulador Proteus con 16 pasos.....	54
Tabla 15: Tiempo de vida útil de baldosas Pavegen considerando 8, 12 y 16 pasos por persona.	55
Tabla 16: Promedio del monto de suministro de servicio de la SEAL en las sedes de la UTP – sede Arequipa	57
Tabla 17: Análisis del monto de energía en hora y fuera de hora punta de la sede Av. Parra.	57
Tabla 18: Análisis del monto de energía en hora y fuera de hora punta de la sede Av. Tacna y Arica..	58
Tabla 19: Comparativa de energía teórica producida por Pavegen y energía producida con simulador Proteus	59
Tabla 20: Inversión de prototipo de sistema piezoeléctrico.	60
Tabla 21: Costo de mantenimiento.	62
Tabla 22: Ahorro aparente con 8 pasos.....	63
Tabla 23: Ahorro aparente con 12 pasos.	64
Tabla 24: Ahorro aparente con 16 pasos.....	64
Tabla 25: Flujo de caja incremental teórico.	65

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Energía producida según escenarios.....	51
Gráfica 2: Tiempo de vida útil de baldosas Pavegen respecto al número de pasos anuales.	56

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Energía potencial	39
Ecuación 2: Periodo de vida útil baldosas en años.....	55

INTRODUCCIÓN

Con el pasar de los años alrededor del mundo se ha dado un incremento tecnológico en cuanto a generación de energía eléctrica; como posible alternativa para la reducción del uso de energía eléctrica convencional se encuentra el uso de piezoelectricidad mediante la tecnología Energy Harvesting (Colectores de Energía) el cual tiene como principio convertir la energía mecánica en energía eléctrica sacando provecho de la energía que se desperdicia con el acto de caminar del ser humano. Para su realización se tomará en cuenta un modelo optimizado de almacenamiento de dicha energía, considerando los siguientes aspectos: captación de energía a partir de las vibraciones o impactos a raíz de las pisadas. [1]

De manera que la aplicación de la mencionada tecnología pueda generar el aprovechamiento de la energía del caminar de las personas en lugares con alta afluencia dentro de la Universidad Tecnológica del Perú – sede Arequipa para su posterior aprovechamiento en la iluminación, carga de diferentes dispositivos tecnológicos, zonas wifi, entre otras posibles aplicaciones.

Considerando diversos artículos, se ha considerado la posibilidad de instalación de baldosas piezoeléctricas en zonas con alta concurrencia la cual también generaría conciencia sobre la conservación del medio ambiente y uso de energías alternativas renovables. [2]

A partir de lo mencionado, se pretende diseñar y simular un sistema piezoeléctrico a través de un software y realizar una comparación costo beneficio para reducir los costos energéticos de la UTP – sede Arequipa.

CAPÍTULO 1

1.1 Planteamiento del Problema

La generación de energía eléctrica es de carácter fundamental para el desarrollo del país y de las industrias en general por lo que el consumo de energía eléctrica tiene un crecimiento gradual con el transcurso de los años. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), comparando la producción de energía del subsector eléctrico del mes de enero del 2018 con la del 2019, se considera un crecimiento del 5.68%. [3]

Además, según informe del COES SINAC (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional), la capacidad y la demanda de energía en 2020 crecerán 2,7% y 4,6%, respectivamente, a 7.300MW y 55.847GWh. [4]

Sin embargo, la generación de energía eléctrica depende de la quema de combustibles fósiles que producen un alto índice de contaminación es por ello que se busca la generación de energías de fuentes inagotables no convencionales como la energía solar, eólica, geotérmica, biomasa, mareomotriz. Según un informe de la Nueva Matriz Energética Sostenible (NUMES) para el 2040, se estima una aportación de energías renovables no convencionales de un aproximado del 27% del total de la oferta bruta interna de energía primaria en el Perú; de acuerdo a ello se ha incrementado el interés en la búsqueda de energías renovables alternativas como soluciones energéticas

surgiendo así las técnicas Energy Harvesting o Cosecha de energía con una variedad de propuestas como los sistemas piezoeléctricos. [5]

De manera que, una condición básica para lograr la generación de energía eléctrica en base a energías renovables es que la metodología que se utilice genere beneficios concretos como ahorro de costos energéticos.

La Universidad Tecnológica del Perú incentiva continuamente al desarrollo de tecnología y uso de energías renovables con la finalidad de sensibilizar y capacitar a sus alumnos a introducir soluciones para el ahorro de costos y a su vez cuidar al planeta. Para ello auspicia diversas actividades como el Foro nacional de cambio climático y energías renovables, seminario de energías renovables como opción rentable y sostenible, entre otras.

Es así que el presente trabajo de investigación considera que existe un desaprovechamiento de la energía mecánica que producen los estudiantes con el acto de caminar ya que estos generan numerosas pisadas a lo largo del día, de manera que resulta pertinente considerar como alternativa energética la tecnología piezoeléctrica en la Universidad Tecnológica del Perú - sede Arequipa, contribuyendo a la disminución del consumo de energía eléctrica convencional y la reducción de costos energéticos.

Pregunta principal de investigación

- ¿En qué medida se reducen los costos energéticos utilizando un sistema piezoeléctrico en la UTP – sede Arequipa?

1.2 Justificación

1.2.1 Económica

Un sistema piezoeléctrico requiere de tecnología que puede resultar ser costosa. Por ello se busca una alternativa a través del diseño y simulación de un sistema piezoeléctrico que capte las pisadas y contribuya así a la reducción de costos energéticos.

1.2.2 Social

Se busca el aprovechamiento de la energía eléctrica generada por las pisadas en universidades generando de manera eficiente energía para los diferentes usos, generando puntos de carga de dispositivos eléctricos en beneficio de los estudiantes, así como también iluminación, zonas wifi entre otros. Además de su contribución con la concientización en temas de cuidado del medio ambiente.

1.2.3 Técnica

Con la aplicación de la tecnología Energy Harvesting (Cosechamiento de energía) mediante dispositivos piezoeléctricos se pretende generar energía limpia que contribuya a generar una reducción de la contaminación ambiental sirviendo como aporte para futuras investigaciones relacionadas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar la reducción de costos energéticos en la UTP – sede Arequipa utilizando un sistema piezoeléctrico simulado.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema piezoeléctrico para obtención de energía.

- Simular el sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus.
- Evaluar el costo – beneficio del sistema piezoeléctrico.

1.4 Alcances y Limitaciones

1.4.1 Alcances

El presente trabajo de investigación tendrá como alcance la simulación de un sistema piezoeléctrico utilizando la tecnología Energy Harvesting, dicha simulación tendrá como base el diseño del sistema piezoeléctrico considerando diferentes etapas: transducción, rectificación, acondicionamiento y almacenamiento con sus respectivos componentes, tipo de material piezoeléctrico y tipo de material para baldosas. Además para la evaluación de costo – beneficio se tendrá en cuenta el ciclo de vida de las baldosas considerando datos de evaluaciones realizadas a las baldosas Pavegen, la inversión del sistema piezoeléctrico, la afluencia de estudiantes y el consumo de energía eléctrica en la UTP – sede Arequipa.

1.4.2 Limitaciones

La limitación consiste en que la tecnología mencionada, únicamente se desarrollará a un nivel de simulación en el que se evaluarán diferentes escenarios para su aplicación dentro de la UTP- sede Arequipa. Además, para la simulación del sistema piezoeléctrico, únicamente se utilizará el software Proteus; los datos de energía de entrada que brinda el piezoeléctrico será simulado por un generador de pulsos (Pulse), los datos de energía generada por el sistema piezoeléctrico serán obtenidos mediante instrumentos de medición del software (voltímetro y vatímetro). El software Proteus no permite simular una batería de manera que en el circuito se contemplarán super capacitores en lugar de esta.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se describirán los principales conceptos, definiciones, tecnologías, entre otros; relacionados con el desarrollo del presente trabajo de investigación.

2.1 Energy Harvesting (Cosecha de Energía)

Consiste en un proceso que permite el aprovechamiento de energía desperdiciada por fuentes externas que pueden ser energía luminosa, térmica o mecánica convirtiéndola en energía eléctrica, la cual es almacenada con el fin de ser aplicada a sistemas electrónicos de bajo consumo. A pesar de que muchas veces no se logre una alimentación totalmente consistente, se puede incluir baterías que pueden incrementar su efectividad. [1]

Existen diferentes aplicaciones en las que se utiliza la tecnología Energy Harvesting como por ejemplo en pisos cerámicos, parquet, textiles mediante nano generadores de energía, en sistemas híbridos combinando la potencia humana con la energía solar, con polímeros electro activos, entre otros; los cuales recolectan energía desperdiciada y la convierte en energía eléctrica para aplicaciones en las diferentes industrias con su transmisión en zonas wifi, 3G, sistemas de iluminación LED. [6]

Además, se debe tener en cuenta que los sistemas de cosecha de energía poseen un esquema general para la captación de energía y el almacenamiento de la misma. [7]

A continuación, se puede observar en la Figura 1 el esquema en mención:



Figura 1: Esquema general de un sistema Energy Harvesting. Fuente: [7]

Primeramente tenemos un sistema de captación de energía el cual capta cualquier tipo de energía existente y luego lo transforma en energía eléctrica, en la parte del acondicionamiento se considera que los captadores de energía tienen las siguientes características en general: la tensión no puede emplearse directamente en la alimentación de circuitos eléctricos ya que no se encuentra regulada, en algunos casos no proporcionan potencia continua y generan potencia media demasiado baja de manera que es necesaria la implementación de un rectificador y convertidor, para este caso se utilizaría el rectificador AC/DC y un convertidor DC/DC, el primero aprovecha la potencia de la corriente continua y una vez conseguida esta, se usa el segundo para conseguir un nivel necesario para la alimentación; luego en la parte de almacenamiento se desarrolla un tipo de batería de litio de película fina y por último se da la aplicación en el dispositivo seleccionado en tiempo real. [7]

2.2 Dispositivo Piezoeléctrico

Se le denomina a aquel sensor que utiliza el efecto piezoeléctrico para poder medir diferentes fuerzas para su conversión a energía eléctrica, contienen cristales que al deformarse por la aplicación de alguna fuerza externa ocasionando que en la superficie

del cristal se generen cargas eléctricas de acuerdo a la dirección de dicha fuerza es que depende su polaridad. [8]

2.3 Efecto piezoeléctrico

Dicho efecto, es conocido como efecto piezoeléctrico directo presentado por los cristales piezoeléctricos del dispositivo. En caso contrario se da el efecto piezoeléctrico inverso en el cual, el cristal piezoeléctrico es aplicado a las caras del cristal provocando que sus dimensiones varíen.

De los dos efectos mencionados en el presente trabajo se desarrollará el efecto piezoeléctrico directo, ya que las pisadas ocasionarán compresión de los cristales. [8]

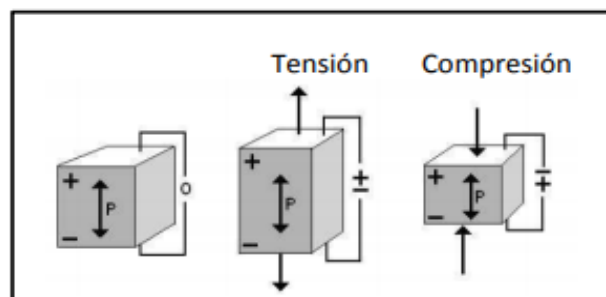


Figura 2: Efecto piezoeléctrico directo. Fuente: [8]

2.4 Tipos de materiales Piezoeléctricos

Existen avances tecnológicos en cuanto a materiales piezoeléctricos se ha desarrollado como material particular el PZT basados en plomo sirviendo en diversas aplicaciones en: actuadores, sensores y transductores debido a sus altas propiedades piezoeléctricas y electromecánicas. Entre los materiales piezoeléctricos más comunes se encuentran: del tipo cerámicos, poliméricos y piezocompuestos. [9]

Los materiales piezocompuestos se encuentran compuestos por una cerámica piezoeléctrica en su fase activa y un polímero en su fase pasiva con la ventaja de

mayor flexibilidad. Los MFC son un tipo de piezocompuesto constituido por varias piezocerámicas entre dos capas adhesivas y películas de electrodos [9]

Los MFC se usan en su mayoría en la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de vibraciones de frecuencias altas y bajas en sus diversos tipos de fuerzas aplicadas sobre estos. [10]

A continuación, se muestra la siguiente tabla con los diferentes tipos de material piezoeléctrico de los cuales se usará el zirconato titanato de plomo:

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Cuarzo	Estabilidad térmica, química y eléctrica. Resistente al desgaste	Menos eficiente generador de energía acústica. Requiere de alto voltaje
Sulfato de litio	Es un receptor más eficiente. Amortiguación acústica óptima.	Es frágil Debe ser empleado a temperaturas menores de 75°C
Cerámicos polarizados	No les afecta la humedad Empleo hasta en temperaturas de 300°C	Baja resistencia mecánica. Menor dureza y resistencia al desgaste que el cuarzo.
Titanato de bario	Buen emisor debido a su módulo piezoeléctrico.	Problemas de amortiguación. Limitado a frecuencias menores de 15MHz Baja resistencia mecánica
Metaniobato de bario	Buena estabilidad térmica	Presenta baja frecuencia y mala resistencia mecánica.

	Puede ser empleado a altas temperaturas	
Zirconato titanato de plomo (PZT)	Considerado como el mejor emisor por su alto modulo piezoeléctrico	Alto coeficiente de deformación.

Tabla 1: Características de los materiales usados como piezoeléctricos. Fuente: [11]

Los materiales cerámicos piezoeléctricos o piezocerámicos son capaces de polarizarse eléctricamente al ser sometidos a esfuerzos mecánicos.

El material basado en Zirconato titanato de plomo (PZT) es el más usado actualmente en la industria con su especial aplicación en sensores y actuadores. [11]

2.5 Formas de captación de energía

Entre lo más comunes en cuanto a la captación de energía mecánica se pueden resaltar los siguientes:

En el tipo tapa de radiador se ejerce fuerza externa mediante un sistema de resortes el cual permite que este recupere su posición inicial.

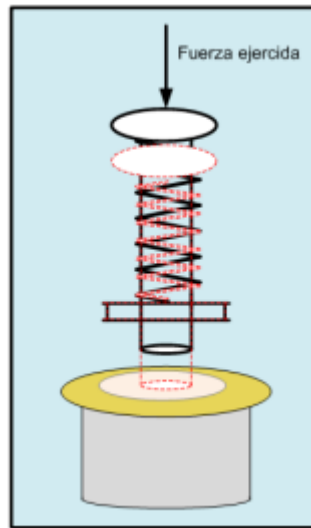


Figura 3: Modelo tapa de radiador. Fuente: [8]

En el tipo de estructura Cantilever la recolección se da mediante vibraciones produciendo una gran deformación, constituye una o dos láminas de dispositivos piezoeléctricos con electrodos tanto en capa superior como en inferior; bajo este tipo de estructura se realizan variadas aplicaciones industriales. [12]

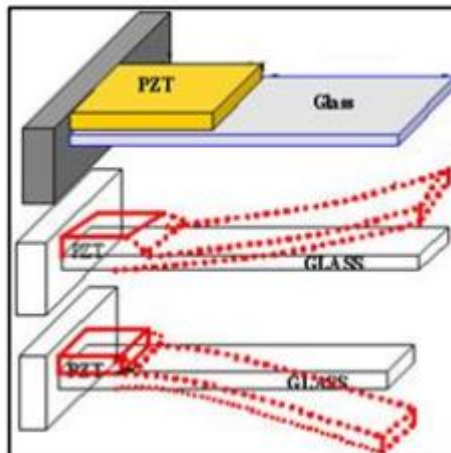


Figura 4: Modelo estructura Cantilever. Fuente: [8]

En el modelo rueda dentada se utilizan un sistema de mecanismo de engranajes para la recuperación de la energía mecánica producida por las vibraciones de las pisadas al caminar.

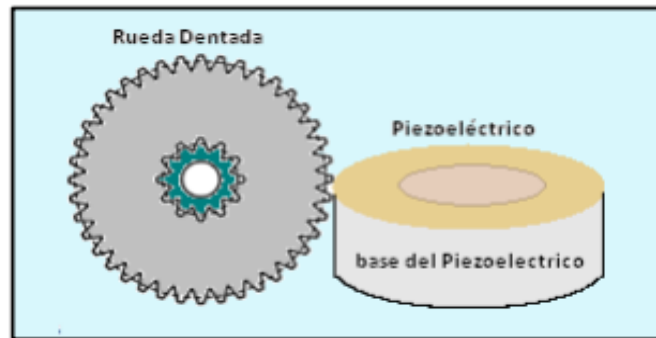


Figura 5: Modelo rueda dentada. Fuente: [8]

2.6 Diseño general del sistema piezoeléctrico

Como diseño básico para la realización de un sistema piezoeléctrico se toma en cuenta la siguiente figura que además precisa equipos en un sistema piezoeléctrico:

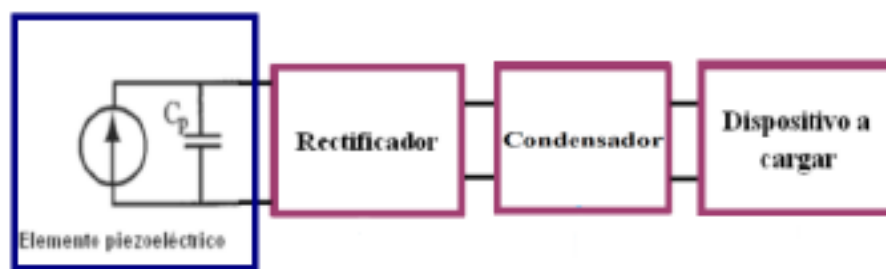


Figura 6: Sistema piezoeléctrico. Fuente: [13]

Como se ve en la figura el sistema cuenta con un elemento piezoeléctrico el cual va a captar la energía mecánica a través de las pisadas, seguido por un rectificador el cual se encarga de transformar energía alterna a energía continua, el condensador que

almacena voltaje producido a raíz de las pisadas de las personas en la UTP – sede Arequipa.

2.7 Baldosa piezoeléctrica PAVEGEN

Las baldosas PAVEGEN fueron creadas por Laurence Kemball – Cook; éstas usan tecnología Energy Harvesting en países europeos y son usadas en diversos ámbitos, como, por ejemplo: estaciones de metro, aeropuertos, centros comerciales, entre otros. [14]

Las baldosas PAVEGEN tienen un tamaño de 45 X 60 centímetros y están diseñadas para lugares con afluencia alta de personas; su superficie es producida a base de caucho reciclado haciéndolas amigables con el medio ambiente. [2]

Con respecto a la baldosa se logra conseguir 7 W de energía por pisada, de lo cual el 95% es usado o almacenada según la aplicación que se le pretende dar. [15]

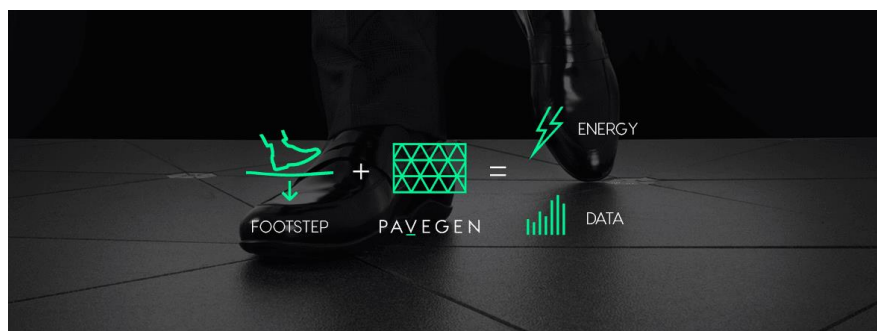




Figura 7: Tipos de baldosas piezoeléctricas PAVEGEN. Fuente: PAVEGEN

2.8 **Software PROTEUS**

Es un software integrado de simulación electrónica que se encuentra diseñado para la realización de proyectos electrónicos en las etapas: diseño, simulación, depuración y construcción. [16]

La mayor característica de este software es que contiene una gran variedad de modelos de dispositivos electrónicos que permiten experimentar con diseños y a su vez evitar variedad de problemas con la implementación real.

Mediante este software se puede realizar una interacción con los distintos elementos que integran un circuito incluyendo micro controladores o microprocesadores, además incluye una adaptada visualización del sistema y un análisis exhaustivo del mismo. [17]

Pantalla principal simulador Proteus

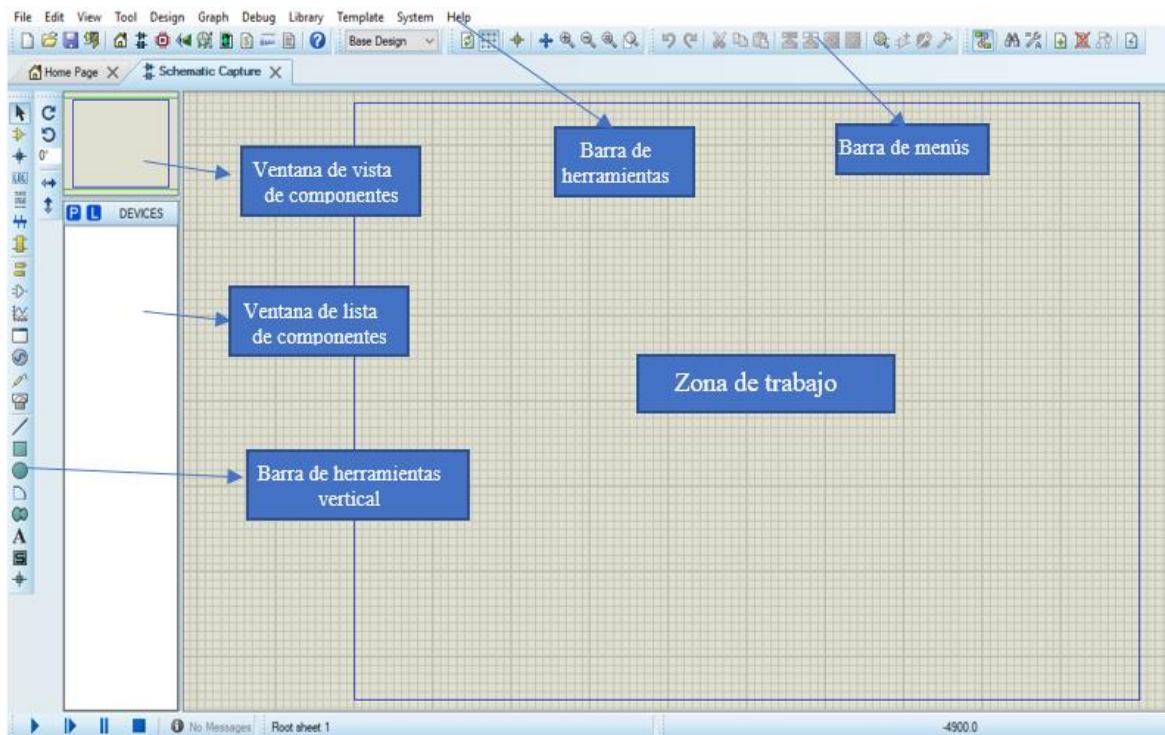





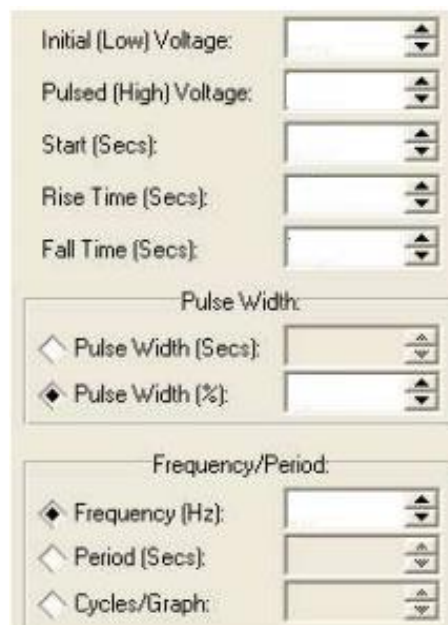
Figura 8: Partes de la pantalla principal del simulador Proteus.

Fuente: Elaboración propia.

Generadores en Proteus

El software de simulación Proteus cuenta también con diversos generadores los cuales producen diversas señales según su tipo como son:

- **Generador DC** (): Este tipo produce una señal de corriente continua sin embargo el software únicamente nos permite configurar en este la tensión de salida.
- **SINE** (): Este tipo produce una onda senoidal de corriente alterna, en este el software nos permite configurar su frecuencia y tensión de salida.
- **Pulse** (): Este tipo produce un pulso, es uno de los generadores más completo ya que en este el software nos permite configurar su tensión a un nivel bajo y alto, momento en que comenzará la onda, tiempos de subida y bajada y la frecuencia de onda teniendo en cuenta valores de frecuencia y periodo.



Initial (Low) Voltage:

Pulsed (High) Voltage:

Start (Secs):

Rise Time (Secs):

Fall Time (Secs):

Pulse Width:

◇ Pulse Width (Secs):


◆ Pulse Width (%):


Frequency/Period:

◆ Frequency (Hz):

◇ Period (Secs):

◇ Cycles/Graph:

- **Pwlin** (): Este tipo de generador es el más completo ya que en este el software nos permite configurar e incluso dibujar la forma de la onda que se necesita obtener.

- **Audio** (): Este tipo de generador permite la simulación de entrada de audio, en este el software nos permite indicar su amplitud y canal a extraer.

Medición de voltaje en Proteus

Para poder medir el voltaje generado en Proteus se tienen instrumentos de medición que operan en tiempo real como el voltímetro y vatímetro, estos pueden ser conectados directamente al circuito. De manera que al iniciar la simulación estos muestran el valor del voltaje a través de sus terminales en formato de fácil lectura digital. [18]

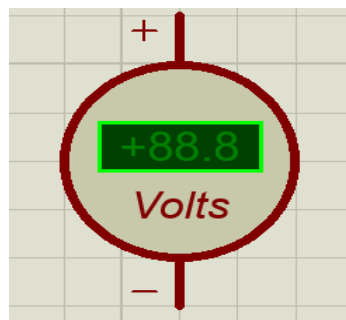


Figura 9: Voltímetro en software Proteus

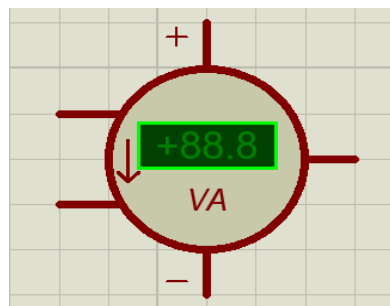


Figura 10: Vatímetro en software Proteus

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE

En el presente apartado, se realiza una investigación sobre los avances más significativos y que guardan relación con el tema de investigación y la tecnología Energy Harvesting mediante sistemas piezoeléctricos y la simulación en el software Proteus.

Según Jiménez Rubio, Fredy; existen diferentes aplicaciones en la actualidad con respecto a la conversión de energía del ambiente en energía eléctrica, además se identifican los procesos y materiales con mayor utilización, aplicando el almacenamiento de energía cinética. Realiza una comparación de diferentes sistemas Energy Harvesting determinando la potencia de cada uno y considerando el tipo de fuente de energía al que pertenecen. [19]

Tomando en cuenta lo mencionado es que se aplicará un almacenamiento de energía.

El autor Sepúlveda Orosco analiza el diseño de un colector de energía piezoeléctrico mediante optimización topológica a partir del cual permite maximizar la transformación

de energía mecánica en eléctrica que genera una persona al caminar, en este trabajo se usó PZT en la aplicación de suelas de zapatos y para el ensayo se consideraron aspectos como diferentes modelos de Energy Harvesting con los voltajes que resultaron de una simulación. Además, se llegó a la conclusión de que el más indicado sería el piezoeléctrico (PZT) diseñado mediante MOT (maximización y optimización topológica), llegando a la conclusión de que esta mejora el desempeño de los piezoeléctricos. [9]

En la investigación realizada por Agatón Aguirre se analiza el impacto potencial a raíz de la generación de energía eléctrica, ahorro monetario, así como también su impacto con la mitigación de emisiones de CO₂; la propuesta consiste en la implementación de 10 baldosas piezoeléctricas en 5 torniquetes en la entrada al campus. Las baldosas que se utilizó en este trabajo fueron Pavegen que actualmente se encuentran en el mercado. Sin embargo, resultó no ser factible debido al requerimiento de una gran inversión y resultó ser factible considerando los insumos de elaboración los cuales son desarrollados con materiales amigables con el medio ambiente y su gran influencia con respecto a la disminución de CO₂ en el ambiente. [2]. Teniendo en cuenta dicha propuesta es que podemos tomar como mejor opción a las baldosas hechas por PAVEGEN.

En cuanto a la aplicación de Energy Harvesting mediante vibración, Shen menciona la mejor alternativa en cuanto la captación de energía de las vibraciones en el ambiente externo, en este uso PZT y la estructura cantiléver, considerando una frecuencia máxima de 100 Hz. Afirma también que los prototipos MFC y PVDF logran funcionar en la aceleración. [20]

En el trabajo realizado por Morales y Contreras en su análisis de la implementación de la energía piezoeléctrica, desarrolla una comparación entre diversas empresas en las que se consideran aspectos tales como: dimensiones, producción energética y disponibilidad de información; resaltando así que la empresa Pavegen es la que tiene mayor disponibilidad de información respecto a la tecnología en mención contando con dimensiones 50cm * 50cm * 50cm y una producción energética de 1,7 W/ min. Morales realizó su aplicación en Cine Colombia llegando a la conclusión de que por 42 pasos se obtiene una potencia de 72 W, de manera que necesita de 9677 pasos para mantener 1 día encendidas las luminarias. [14]

De acuerdo a Casanova Gómez es que se deduce que los movimientos de vibración que produce una persona al caminar pueden ser debidamente aprovechados para su consecuente utilización en la producción de energía eléctrica usando sistemas piezoeléctricos y electromagnéticos para captarla. Hace mención que en los sistemas piezoeléctricos implementados en zapatos con un peso de una persona promedio de 68kg se puede llegar a producir hasta 67 W de potencia. [7]

En el trabajo de grado de Cifuentes Gutiérrez se considera una baldosa piezoeléctrica la cual adapta, diseña y simula mediante el software Proteus un sistema de iluminación considerando un bajo consumo energético compuesto por LEDs; en el cual observa el comportamiento del sistema piezoeléctrico hasta lo más aproximado a la realidad. A partir de esto concluye que es mejor utilizar piezoeléctricos con un área transversal reducida con el fin que estos produzcan un voltaje mayor, para ello usó piezoeléctricos de 10mm de diámetro. [21]

La simulación también es usada por Palomino Vera presentando un prototipo de bicicleta elíptica a partir del cual genera energía eléctrica para su aprovechamiento en un ambiente de deporte, analiza los modos de captación de energía y considera el tipo de estructura cantiléver que es el que más se adapta a su prototipo, realiza la

simulación de este en el software Proteus utilizando un cuadriplicador para elevar el voltaje del sistema y una batería para almacenar la energía residual. [13]

Asimismo, Mallma y Caller introducen el concepto de Energy Harvesting para la recuperación de energía en el sector industrial; concluyendo que la técnica piezoeléctrica es la más capaz considerando los parámetros de tensión, corriente y potencia de salida. La aplicación de dicha tecnología la simula para una banda transportadora incluyéndole modo de captación de energía por rueda dentada. [22]

Por último, en cuanto a simulación el autor Concha genera una propuesta de implementación de un sistema piezoeléctrico y su aplicación en la estación de trenes eléctricos, con implementación de baldosas piezoeléctricas PAVEGEN, además de una simulación con el software LINGO en el que analiza el comportamiento de las personas al momento de ingreso al tren eléctrico considerando puntos estratégicos de mayor afluencia. [15]

CAPÍTULO 4

DESARROLLO METODOLÓGICO

4.1 Metodología de la investigación

En primer lugar, para diseñar el sistema piezoeléctrico se consideran etapas de transducción, rectificación y acondicionamiento considerando dentro de estas el tipo de materiales piezoeléctricos, diodos, capacitores, inductores y sus características.

En segundo lugar, para realizar la simulación del sistema piezoeléctrico se usará el software Proteus, definiendo el circuito del sistema, elementos considerados en el software Proteus, cantidad de energía mecánica aplicada teniendo en cuenta el peso promedio de las personas al caminar, tiempo en segundos al dar un paso, potencia teórica generada por pisada.

En tercer lugar, para la evaluación de costo - beneficio que otorga el sistema piezoeléctrico se considerará el costo del consumo de energía eléctrica de la UTP – sede Arequipa, se realizará una comparación de costos y producción de energía eléctrica generada entre el sistema piezoeléctrico diseñado y la tecnología Pavegen,

se evaluará el tiempo de vida útil de las baldosas Pavegen y la energía producida considerando 3 escenarios; a partir de ello se pretende obtener un beneficio mayor al costo de inversión además de reducir los costos de consumo energético de la Universidad Tecnológica del Perú en base a los recibos de luz.

4.2. Diseño de la investigación

4.2.1. Tipo de investigación

- **Descriptiva – analítica**

Es descriptiva ya que se involucra las características del sistema piezoeléctrico haciendo una comparativa con la tecnología de la empresa Pavegen.

Es analítica ya que involucra el uso del software Proteus para la simulación del sistema piezoeléctrico, incluyendo una evaluación de la energía generada.

A continuación, se muestra una tabla con las actividades a realizar según los objetivos específicos así como los métodos a usar y herramientas que apoyarán a su realización.

OBJETIVO ESPECÍFICO 1: Diseñar un sistema piezoeléctrico para obtención de energía.			
ACTIVIDADES	MÉTODO	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Diseñar el sistema piezoeléctrico	Se evaluarán las características de los componentes de un sistema piezoeléctrico convencional.	Se realiza una selección de información de diversos documentos.	Hojas de Microsoft Word

Determinar componentes del circuito del sistema piezoeléctrico	Se evalúan los componentes del sistema piezoeléctrico diseñado.	Se realizan cuadros de evaluación de los componentes del sistema piezoeléctrico.	Cuadros en Microsoft Word
OBJETIVO ESPECÍFICO 2: Simular el sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus.			
Establecer valores necesarios para simulación	Se estima el promedio del peso de las personas al caminar	Se realiza un cuadro con los pesos considerando la energía mecánica que producen.	Cuadro en Excel
Diseñar circuito del sistema piezoeléctrico en Proteus	Se evalúan componentes del circuito en base al sistema piezoeléctrico evaluado.	Se seleccionan componentes necesarios para el circuito en Proteus.	Software Proteus
Simular el sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus	Se utiliza el software Proteus para ingresar el circuito del sistema piezoeléctrico	Se realiza una toma de registro de datos de energía generada	Registro en Excel Software Proteus
OBJETIVO ESPECÍFICO 3: Evaluar el costo – beneficio del sistema piezoeléctrico.			

Caracterización energética de consumo y costos	Se estima el promedio del consumo y costos energéticos de la UTP – sede Arequipa	Se realiza una tabla con los consumos y costos energéticos de los últimos meses	Recibos de SEAL Tablas en Excel
Realizar una comparativa con empresa PAVEGEN	Se comparan la producción de energía eléctrica del sistema piezoeléctrico con la tecnología Pavegen	Se realiza un cuadro comparativo de los dos sistemas	Tablas en Excel Cuadro comparativo
Evaluación de costo – beneficio de implementación del sistema piezoeléctrico	Se evalúan los costos tanto del sistema como de la tecnología Pavegen	Se realizan cálculos necesarios para verificar el costo beneficio Evaluación VAN, TIR y Flujo de caja	Tablas en Excel

Tabla 2: Actividades en relación a los objetivos. Fuente: Elaboración propia

4.3. Operacionalización de variables

4.3.1. Variable dependiente

- Costos energéticos

4.3.2. Variable independiente

- Sistema piezoeléctrico

Objetivos específicos	Variables	Dimensiones	Indicadores	Subindicadores	Unidad de medida	Instrumento
1.- Diseñar un sistema piezoeléctrico para obtención de energía 2.- Simular el sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus 3.- Evaluar el costo – beneficio del sistema piezoeléctrico	Variable independiente: - Sistema piezoeléctrico	Peso promedio de personas	Caracterización de peso promedio de personas	Peso promedio	Kg	Revisión de datos
		Componentes técnicos del sistema	Datos del sistema piezoeléctrico	Piezoeléctrico (PZT)	Watts	Revisión de datos
				Batería de almacenamiento	Amper. hora	Revisión de datos
	Variable dependiente: -Costos energéticos	Elementos necesarios para simulación	Datos del circuito en Proteus	Generador de pulsos	Watts	Voltímetro (Proteus)
				Multiplicador de voltaje	Watts	Voltímetro (Proteus)
		Energía generada	Energía generada por el sistema	Potencia generada por el prototipo	Watts	Vatímetro en software Proteus
		Evaluación de consumo energético de la UTP sede – Arequipa	Promedio de consumo energético de la UTP sede - Arequipa	Consumo energético mensual	kW/h	Recibos de SEAL
		Relación costo beneficio	Factibilidad económica	VAN	Soles	Tablas de Excel
				TIR	%	

Tabla 3: Operacionalización de variables. Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5

DISEÑO DEL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO PARA LA REDUCCIÓN DE COSTOS ENERGÉTICOS EN LA UTP – SEDE AREQUIPA

5.1. Diseño del sistema piezoeléctrico

Para el diseño se toma como referencia el sistema del trabajo de Morales Espitia, el cual se muestra en la figura 6 y la descripción de pasos principales para un sistema piezoeléctrico de Palomino Vera de la fuente [13].

El sistema piezoeléctrico tiene las fases que se muestran a continuación:

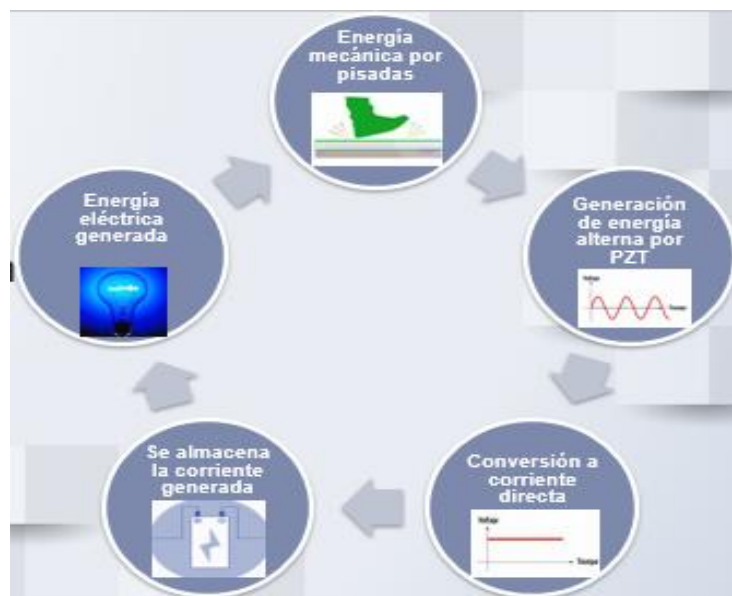


Figura 11: Sistema piezoeléctrico. Fuente: Elaboración propia

Y en consecuencia para su realización se consideran las etapas de transducción, rectificación, acondicionamiento y almacenamiento:

5.1.1. Etapa de transducción

En esta etapa se considera como fuente mecánica de captación de las pisadas y el efecto piezoeléctrico que surge al aplicar una determinada fuerza sobre el transductor. Como fuente mecánica de captación de pisadas se consideran materiales piezoeléctricos, los cuales recuperan su estado original luego de ser presionados por las pisadas. Además, el modo de captación de energía es de estructura del tipo tapa de radiador. [13]

5.1.2. Etapa de rectificación

En esta etapa se considera primordialmente un conversor de energía AC/DC el cual se encargará de transformar la energía mecánica alterna en energía continua, para ello se usarán tres dispositivos de rectificación un doblador un cuádruplicador y un puente de diodos; en el caso del cuádruplicador permitirá elevar el voltaje y corriente.

5.1.3. Etapa de acondicionamiento

En esta etapa se considera el voltaje de entrada, condicionar la energía almacenada y luego obtener el voltaje de salida, así como también la corriente generada. Se considera también una distribución óptima para capturar la energía proveniente del piezoeléctrico, acondicionarla y administrarla. [13]

Además, se considera dentro de esta etapa multiplicar el voltaje obtenido para tener una mayor eficiencia y generar un voltaje de salida mayor.

5.1.4. Etapa de almacenamiento

En esta etapa, lo más importante es aprovechar al máximo la energía generada por el material piezoeléctrico (transductor piezoeléctrico) por lo que ésta debe ser automáticamente almacenada para su posterior uso.

5.2. Componentes del Sistema piezoeléctrico

5.2.1. Baldosa

En primer lugar, con respecto al material que se usará para la baldosa se deben tener en cuenta aspectos como: circulación de personas con alta afluencia de manera que el material debe ser necesariamente resistente, la corrosión y oxidación probable según el tipo de ambiente en el que será instalada y rigidez para que pueda ser transmitida sin ser disipada. [21]

En segundo lugar, a partir de los aspectos antes mencionados se selecciona la mejor alternativa considerando características de diversas baldosas según tipo de material; en este caso se toma en cuenta la información analizada por CIFUENTES, el cual consideró materiales como adoquines de concreto, baldosas cerámicas, baldosas de concreto y Gres porcelánico; de las cuales consideró y comparó las especificaciones técnicas y dentro de estas las dimensiones, absorción, resistencia, densidad y aplicación.

En tercer lugar, como criterios de evaluación de los diferentes materiales tomó en cuenta la rigidez, resistencia a la abrasión, resistencia al deterioro ambiental, la

facilidad de instalación y el peso. De todo ello, saca como conclusión la siguiente tabla:

- **Evaluación de material para baldosa**

Criterio de selección	Rigidez		Resistencia a la abrasión		Resistencia al deterioro ambiental		Facilidad de instalación		Peso		Total
Peso del criterio	30%		15%		20%		20%		15%		100%
Alternativa	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	
Adoquín de concreto	5	1,5	4	0,6	4	0,8	3	0,6	2	0,3	3,8
Baldosa cerámica	3	0,9	5	0,75	4	0,8	4	0,8	5	0,75	4
Baldosa de concreto	5	1,5	4	0,6	4	0,8	4	0,8	4	0,6	4,3
Gres porcelánico	3	0,9	4	0,6	5	1	4	0,8	4	0,6	3,9

Tabla 4: Matriz de selección de material para baldosa. Fuente: [21]

De la matriz, el material que más se ajusta a las características necesarias sería la baldosa de concreto considerando que será para la afluencia y paso de personas teniendo un alto valor en cuanto a rigidez, resistencia y a su fácil transportación.

5.2.2. Componentes de la etapa de transducción

- **Evaluación de material piezoeléctrico**

Se considera este tipo de piezoeléctrico (PZT – zirconato titanato de plomo) ya que de acuerdo a una evaluación y comparación entre diversos tipos de piezoeléctricos presentada por Concha Reátegui, este es considerado como el mejor emisor, con un alto coeficiente de deformación. [15]

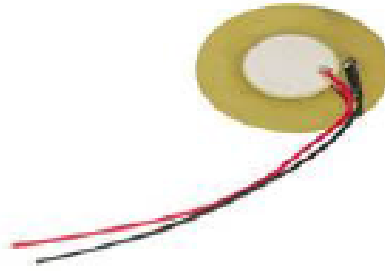


Figura 12: Material piezoeléctrico. Fuente: [13]

En cuanto al tipo y tamaño de piezoeléctrico PZT, se consideran los valores de diámetro y espesor del tipo producido por la empresa Channel Industries INC. Referenciado por CIFUENTES el cual toma un diámetro pequeño que coincide con los requerimientos del presente trabajo de investigación de manera que se usará para poder multiplicar en mayor proporción el voltaje que este pueda generar.

Typical Mechanical Tolerance Levels for Plates and Discs

The image contains two technical diagrams. The left diagram shows a disc with diameter d_o and thickness t . The right diagram shows a rectangular plate with length l , width w , and thickness t .

Disc (dia) Plates (l & w)		Level A Fully Machined (\pm)		Level B Minimal Machining (\pm)		Level C As Fired (\pm)	
INCH	MILLIMETER	INCH	MILLIMETER	INCH	MILLIMETER	INCH	MILLIMETER
0.125-1.500	3.2-38.1	0.003	0.08	0.010	0.25	0.015	0.38
1.500-2.500	38.1-63.5	0.005	0.13	0.015	0.38	0.020	0.50
2.500-3.500	63.5-88.9	0.005	0.13	0.020	0.50	0.025	0.64
3.500-4.500	88.9-114.3	0.010	0.25	0.025	0.64	0.040	1.02
4.500-6.000	114.3-152.4	0.010	0.25	0.030	0.76	0.050	1.27
Disc & Plate (thickness) (t)		Disc & Plate (thickness) (t)		Disc & Plate (thickness) (t)			
0.010-0.015	0.25-0.38	0.001	0.03	0.002	0.05		
0.015-0.035	0.38-0.89	0.001	0.03	0.002	0.05		
0.035-0.080	0.89-2.03	0.002	0.05	0.003	0.08		
0.080-0.200	2.03-5.08	0.003	0.08	0.008	0.20		
0.200-0.500	5.08-12.70	0.004	0.10	0.010	0.25		
0.500-1.000	12.70-25.40	0.005	0.13	0.020	0.50		

Figura 13: Tolerancias mecánicas de piezoeléctricos de Channel Industries INC. Fuente: [21]

De manera que el tipo de piezoeléctrico a utilizar en el sistema tendrá 10mm de diámetro, y un espesor de 1mm según ficha del fabricante como se muestra a continuación:

Piezoeléctrico PZT 5500		
Dimensiones	Unidad	Valor
Diámetro (D)	m	0,01
Espesor (h)	m	0,001

Tabla 5: Dimensiones piezoeléctrico PZT 5500. Fuente: [21]

Asimismo, se consideran las características del PZT según fabricante:

Piezoeléctrico PZT 5500		
Características	Unidad	Valor
Densidad	Kg/m ³	7600
Módulo de Young	N/m ²	5,20E+20
Constante dieléctrica		1750
Constante piezoeléctrica	Vm/N	0,0258
Coefficiente de acoplamiento		0,73
Tangente de pérdida dieléctrica		0,02
Factor de calidad mecánico		75

Tabla 6: Características del piezoeléctrico PZT 5500. Fuente: Channel Industries INC

Con respecto a las características del piezoeléctrico CIFUENTES realiza unos cálculos considerando la constante del piezoeléctrico (V_a de 0.4632 V/N)

multiplicándola con la fuerza ejercida sobre el material (1000N) la cual produciría un voltaje de 463.2V.

De manera que considerando un peso promedio de 70Kg en una persona (700N), generaría un voltaje de 324.24 V. [21]

- **Distribución de los PZT (piezoeléctricos)**

Para la distribución se tomará en cuenta una conexión de forma paralela permitiendo que se pueda lograr una presión homogénea e instantánea en cada instante de tiempo. Y para obtener y asegurar un mayor rendimiento se colocarán 9 piezoeléctricos PZT distribuidos de la siguiente manera:

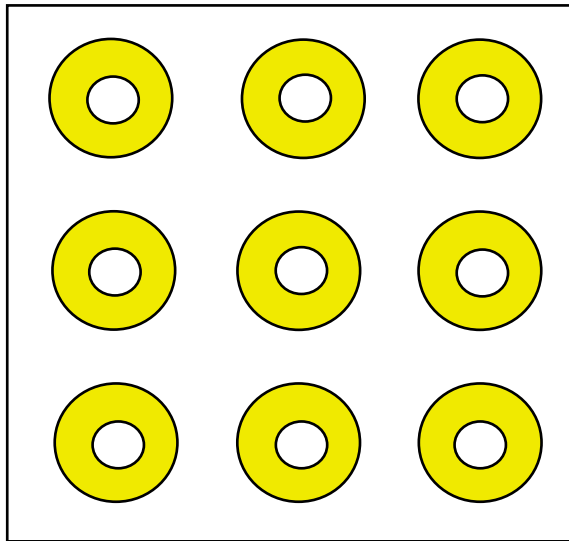


Figura 14: Distribución de piezoeléctricos en baldosa. Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Componentes de la etapa de rectificación

Para la etapa de rectificación se consideran los siguientes componentes:

- **Diodos**

Con respecto a los diodos se tendrán en cuenta los siguientes:


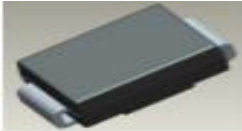

Tipo – Nombre Proteus	Descripción
<p>Diodo 1N4007</p> 	<p>Diodo rectificador de recuperación estándar</p> <p>De serie de los más utilizados convierte la corriente alterna en directa con alta capacidad de corriente de sobretensión. [23]</p>
<p>Diodo Schottky B2100- 13</p> 	<p>Diodo que cuenta con baja pérdida de potencia y alta eficiencia. Soldadura a alta temperatura lo cual lo hace más resistente. [24]</p>
<p>Diodo Schottky 6TQ045</p> 	<p>Diodos de serie rectificadores optimizados para baja fuga inversa a alta temperatura. [25]</p>

Tabla 7: Evaluación de diodos. Fuente: Elaboración propia.

- **Puente de diodos**

A partir de esto se simulará un puente de diodos con los del tipo Schottky que son considerados por Palomino Vera, el cual realiza una comparación de estos con diodos convencionales de silicio 1n4001, obteniendo como resultado de 15 y 16.7

respectivamente al ser simulados concluyendo que este último permite obtener una mayor corriente y voltaje.

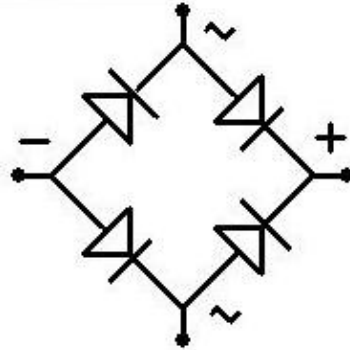


Figura 15: Puente de diodos. Fuente: [13]

- **Inductor**

Se tienen en cuenta inductores o llamados también bobinas las cuales cuentan con alambre aislado y a su vez almacena energía mediante autoinducción generando voltaje proporcional al cambio de la corriente. [26]

- **Transistor – MOSFET – 2N6796**

Este tipo de transistor está basado en la estructura MOS, en este existe un enriquecimiento que hace referencia al aumento de conductividad eléctrica en la zona de inversión. La estructura MOS se encuentra compuesta básicamente por dos terminales: una de substrato de silicio sobre el que se genera otra capa de óxido de silicio el cual cuenta con características aislantes y otra capa de metal con características conductoras. [27]

5.2.4. Componentes de la etapa de acondicionamiento

Para esta etapa se usará un multiplicador de energía pudiendo generar un incremento en el voltaje de salida. Además, se encargará de recolectar la energía continua que sale de la etapa de rectificación acondicionando el voltaje que permitirá recargar la batería.

- **Capacitores**

Se toman en cuenta condensadores cerámicos luego de haber evaluado diversas opciones en la tabla que se muestra a continuación:

Material	Ventajas	Desventajas
Cerámica	Alta permisividad, y pérdidas casi nulas. Constante dieléctrica muy alta	Sensibles a la temperatura
Lámina de plástico	Capacitancia estable y buen aislamiento.	Corriente de fuga media.
Mica	Baja corriente de fuga. Alta estabilidad.	Costo elevado
Poliéster	Poca pérdida y muy buen factor de potencia.	Costo elevado
Electrolíticos	Precio razonable y capacitancia baja.	Alta corriente de fuga.

Tabla 8: Evaluación de capacitores. Fuente: Elaboración propia.

Luego de evaluar las características de los diferentes tipos de condensadores se usarán los del tipo cerámico no electrolítico.

En el software Proteus, será encontrado en la librería como CAP – Generic non electrolytic capacitor y CAPACITOR – Active. Además, estos serán usados como

fuelle de almacenamiento de energía cumpliendo una función muy similar a las de las baterías ya que son super capacitores. Esto será usado en el software Proteus ya que este no permite simular baterías.

5.2.5. Componentes de la etapa de almacenamiento

- **Evaluación de baterías para almacenamiento**

Para ello a continuación se realiza un cuadro comparativo de las características de tipos de baterías según material:

Tipo según material	Características
Plomo – ácido	Bajo costo, baja vida útil y baja densidad de energía
Nikel – Cadmio	Mayor densidad energética que las anteriores, toxicidad por el cadmio.
Sodio – Azufre	Eficiencia del 100% pero trabaja a altas temperaturas (300° C)
Sodio – Nikel (ZEBRA)	Mayor voltaje, sistema a altas temperaturas, aún no se comercializa.
Ion – Litio	Alta densidad de energía y ciclo de vida relativamente aceptable

Tabla 9: Evaluación de baterías según material. Fuente: [28]

De la evaluación de las baterías mencionadas, las que tiene mayor potencial de desarrollo en el presente trabajo de investigación son la de Ion Litio para el almacenamiento de energía.

Es así que, considerando que se generará una energía de 45.85 kW.h generados al día (considerando 4 baldosas) y realizando los siguientes cálculos: se opta por una batería de 48 V y 40000mAh.

$$\text{Amperaje} = \frac{\text{Energía producida al día}}{24}$$

$$\text{Amperaje} = \frac{46000}{24}$$

$$\text{Amperaje} = 1926.67 \text{ W.h}$$

$$\frac{1926.67}{48} = 39.93 \text{ A.h}$$

De acuerdo a ello, se opta por una batería de 48 V y 40000mAh; por lo que se considerará la siguiente batería de litio cuyas características se detallan en la ficha técnica en el ANEXO 3:



Figura 16: Batería Litio LG RESU 3.3 48V. Fuente: [29]

CAPÍTULO 6

SIMULACIÓN DEL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO MEDIANTE EL SOFTWARE PROTEUS

6.1. Establecer valores necesarios para simulación en Proteus

Se investigó sobre el alumnado de la UTP, por ello se considera la siguiente tabla especificando la cantidad de alumnado por facultad en la sede de Arequipa, información perteneciente al último periodo académico del año 2018.

Estudiantes de pregrado del último periodo académico 2018 - UTP	
Facultad	N.º de estudiantes
Administración y Negocios	1943
Derecho y Ciencias Humanas	2009
Ingeniería	5384
Total de estudiantes	9336

Tabla 10: Número de estudiantes por facultad de pregrado de la UTP Arequipa – 2018

De acuerdo a la información detallada en el ANEXO 1, se tuvo un total de 9336 alumnos de pregrado el año 2018 en la UTP – sede Arequipa, por lo que se considerará esa cantidad como flujo diario de personas.

6.1.1. Promedio del peso de las personas

Según un estudio realizado por un proyecto de diseño de la Facultad de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali – Colombia a un total de 385 personas de la universidad considerando medidas de peso, talla, género, ocupación y edad; de las cuales 232 son mujeres y 153 hombres. De estos el 63.4% son estudiantes, el 5.7% personal administrativo, 9.4% colaboradores y 3.8% profesores. Además, la edad promedio de la muestra utilizada es de 21 años. [30]

Del cual se identificó que el promedio del peso del género femenino es de 59,75Kg y el peso promedio del género masculino es de 74,92Kg.

Con un promedio general de 67,335Kg por lo que se considerará que el promedio en este trabajo de investigación será de 70Kg.

6.1.2. Energía potencial por pisada

Para realizar el cálculo del valor de la potencia generada por cada pisada es indispensable encontrar la energía potencial, a partir de ello se efectúa el cálculo mediante la siguiente fórmula usada por Agatón Aguirre:

$$E_p = 1,3 * \bar{P} * g * h$$

Ecuación 1: Energía potencial

En la cual el valor 1,3 hace referencia a la fuerza que ejercemos al dar un paso según Nilsson y Thorstensson; los valores que se toman en cuenta se encuentran entre 1 a 1.5 al momento de caminar y de 2 a 2.9 al momento de correr. [31]

Por otro lado, se considera 70 Kg como un valor promedio del peso de una persona, gravedad de $9,8 \text{ m/s}^2$ y una altura (h) como la altura que se desplaza la superficie del piezoeléctrico según Pavegen equivalente a 0.0005 metros.

Con los datos antes mencionados aplicados a la fórmula de la ecuación 1, nos da como resultado una energía potencial igual a 4.459 J.

$$E_p = 1.3 * 700 \text{ N} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.0005 \text{ m}$$

$$E_p = 4.459 \text{ J}$$

Seguidamente, se convierte el valor encontrado a potencia en Watts dividiendo el resultado obtenido entre el tiempo promedio por paso que da una persona al caminar según Nilsson y Thorstensson es de 0.52s por paso; obteniendo una potencia de 8.575 W equivalente a 0.008575 kW por pisada.

Energía potencial (J)	Potencia (W)	Potencia (kW)
4.459 J	8.575 W	0.008575 kW

El valor obtenido de forma teórica difiere en 0.885 W ya que las baldosas Pavegen producen hasta 7,69 W por pisada.

6.2. Simular el sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus

Inicialmente como referencia el siguiente circuito presentado en la fuente de Cifuentes y López, en el cual considera como componente del sistema en el software Proteus 4 piezoeléctricos, un sensor de fotorresistencia una batería y un LED.

En dicho circuito prueban con un PZT 5500 con una constante piezoeléctrica de 0,0258 Vm/N.

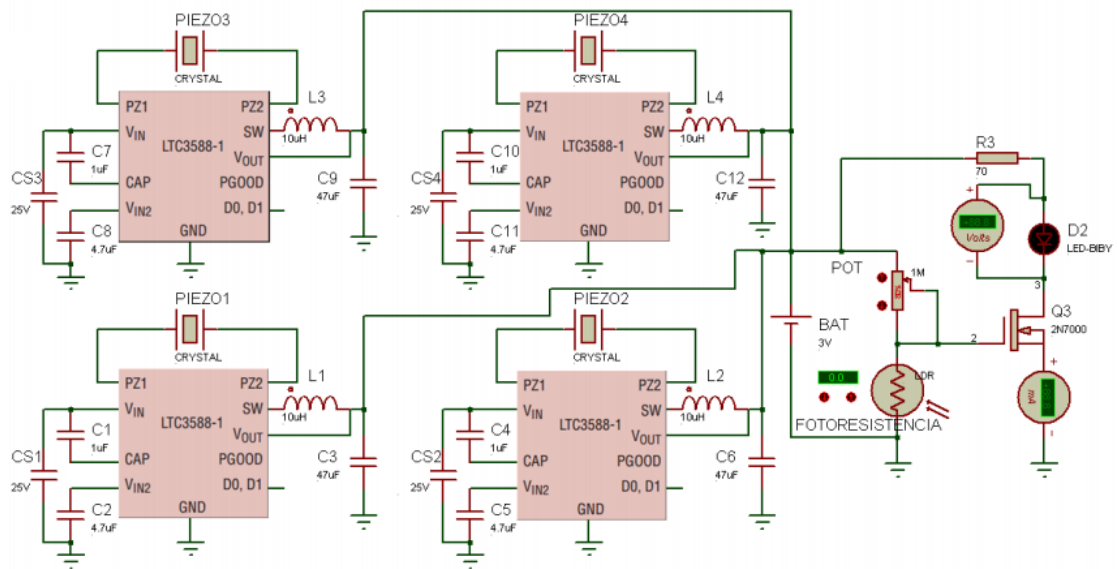


Figura 17: Circuito electrónico con 4 integrados LTC 3588-1, sensor de foto resistencia, batería y LED. Fuente: [21]

En cuanto al LTC 3588 – 1 es un circuito integrado que tiene como típica aplicación los piezoeléctricos Energy Harvesting regulando y optimizando el voltaje. Asegurando que se logre extraer la máxima energía posible del sistema piezoeléctrico. [32]

A partir de esto, se quiere simular un circuito similar al LTC3588-1, teniendo en cuenta la rectificación de la señal para obtener y transferir una máxima energía posible desde el piezoeléctrico PZT.

Es así que se busca una alternativa óptima con super capacitores los cuales entregan una corriente de salida aun mayor que la generada por el multiplicador de voltaje, teniendo una eficiencia aproximadamente de 86% y a su vez mantiene por más tiempo la luz del led que se usará en Proteus encendida.

6.2.1. Circuito multiplicador de voltaje

Para realizar el circuito multiplicador de voltaje se consideran circuitos probados como doblador, triplicador, cuádruplicador y hasta quintuplicador los cuales seguidamente serán simulados en el software Proteus.

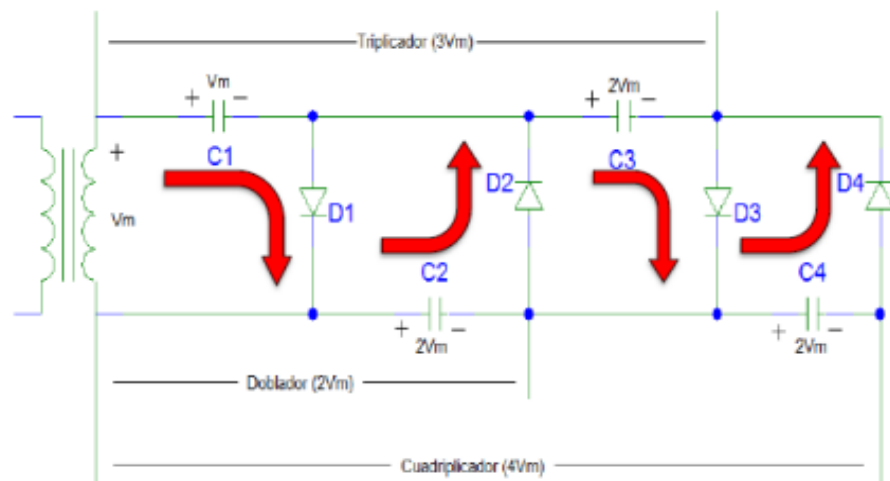


Figura 18: Circuito cuádruplicador de voltaje. Fuente: [21]

Este circuito multiplicador de voltaje es necesario ya que el voltaje de entrada es bajo de manera que se torna necesario elevar en lo posible el voltaje y por ende la corriente del sistema piezoeléctrico.

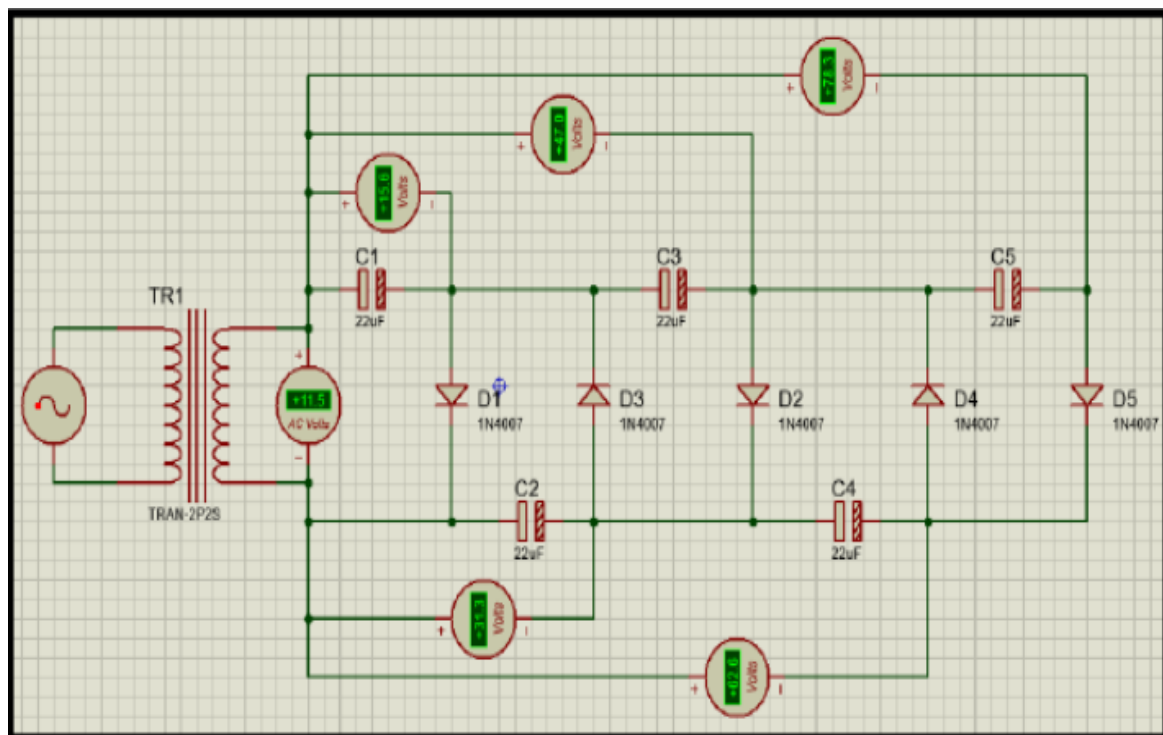

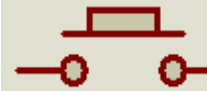


Figura 19: Circuito multiplicador de voltaje. Fuente: [33]

6.2.2. Elementos a usar en la simulación del circuito en el software

Luego se probó con dos circuitos que se muestran a continuación:

En primer lugar, para la simulación de ambos se tomaron en cuenta los siguientes elementos:

Elementos del circuito del sistema piezoeléctrico			
Device	Library	Description	Imagen
1N4007	DIODE	Silicon Rectifier. Maximum Recurrent Peak Reverse voltage 1000V. Maximum Average Forward Rectified Current	
BUTTON	ACTIVE	SPST Push Button	







CAPACITOR	ACTIVE		
DIODE-SC	DEVICE	Generic schottky diode	
LED-YELLOW	ACTIVE	Animated LED model (Yellow)	
RELAY	ACTIVE	Animated Relay model	
RES	DEVICE	Generic resistor symbol	
VSOURCE	ASIMMDLS	DC Voltage Source	

Tabla 11: Elementos del circuito del sistema piezoeléctrico.
Fuente: Elaboración propia.

Con el uso de estos elementos de la librería del software Proteus se simula el siguiente circuito en el cual se formará un generador de pulsos en la primera fase, puente de diodos en la segunda fase, multiplicador de voltaje en la tercera fase y un switch para encendido de luz led en la cuarta fase. A continuación, se muestra el circuito implementado:

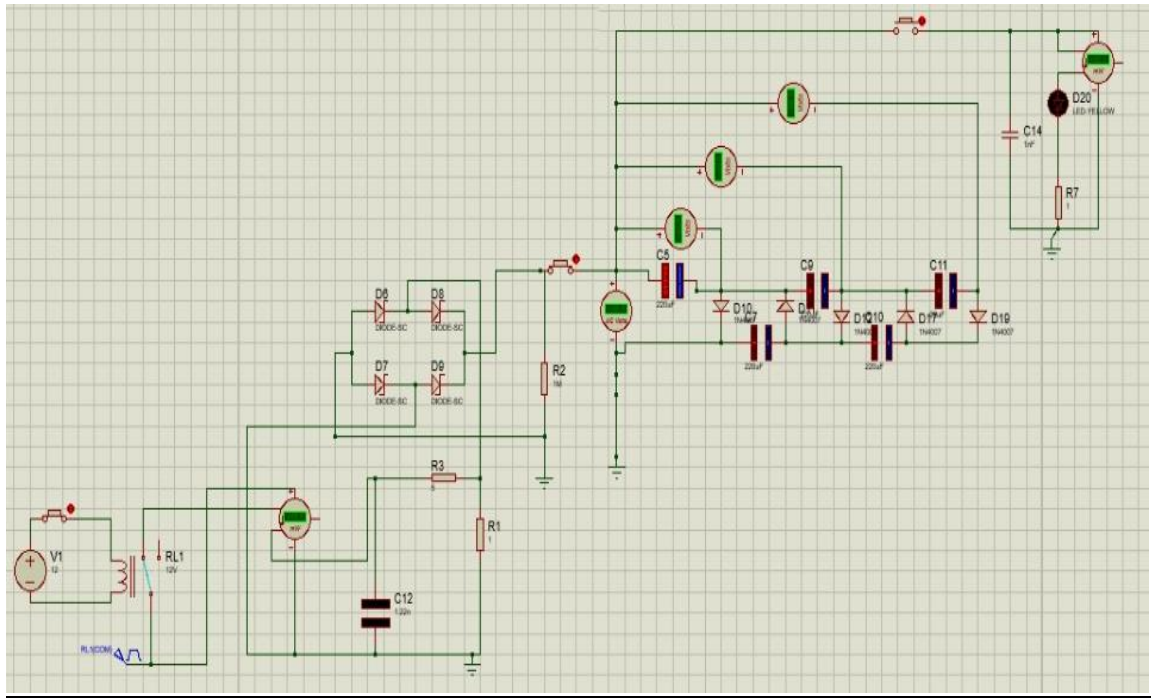


Figura 20: Circuito del sistema piezoeléctrico en Proteus.

Fuente: Elaboración propia.

En este circuito se ingresaron los valores correspondientes al peso promedio de una persona al dar un paso 700N y tiempo 0.52 segundos por paso.

Seguidamente se realizó un segundo circuito para mejorar la eficiencia en cuanto a la obtención de la energía de salida. En este se modifica la primera fase en la que se conecta el generador de pulsos a un relay obteniendo en este último un máximo de 8.64 W de energía generada a partir de 7.41 W iniciales.

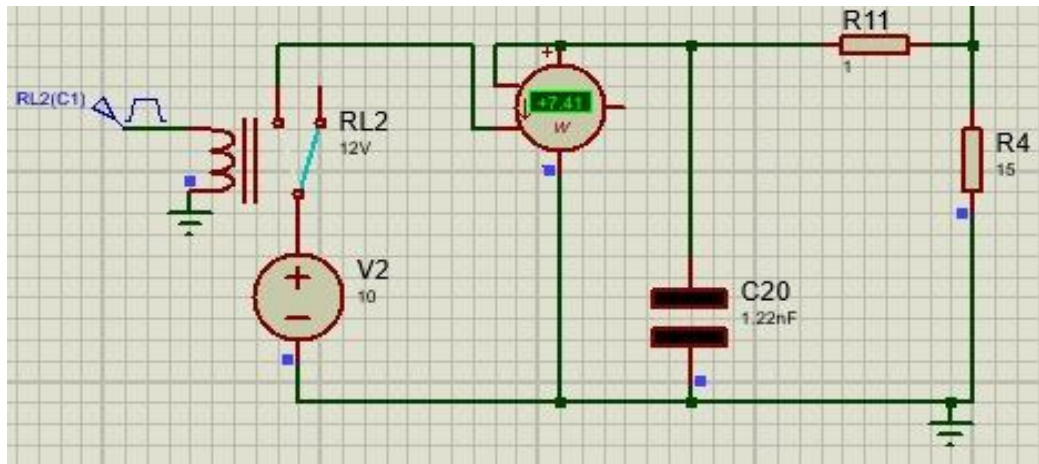


Figura 21: Potencia generada por pisada en circuito piezoeléctrico simulado.
Fuente: Elaboración propia.

En la primera etapa de la generación de pulso que hace referencia a la pisada que da una persona al caminar se obtiene un total de 7.41W lo cual varía según el tiempo llegando a un máximo de 9.90 W. De esta simulación se obtiene como energía generada final 864mW que llega a un máximo de 996 mW, como se muestra a continuación:

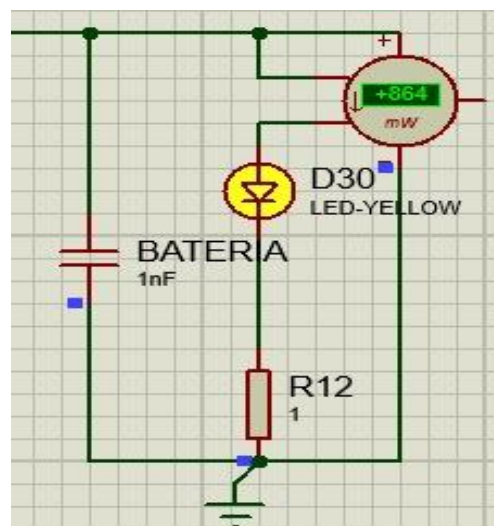


Figura 22: Energía generada por el circuito del sistema piezoeléctrico simulado.
Fuente: Elaboración propia.

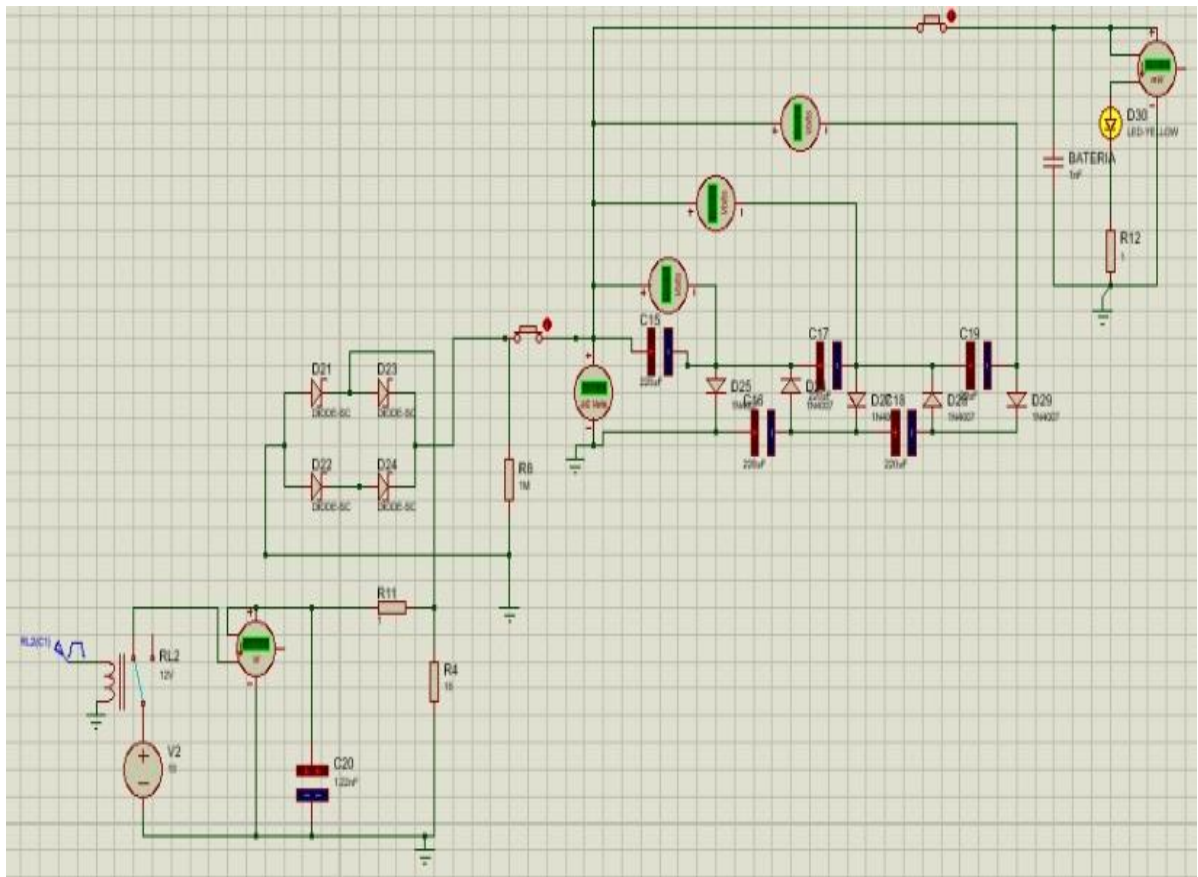


Figura 23: Circuito completo final del sistema piezoeléctrico simulado en Proteus.

Fuente: Elaboración propia.

- **Promedio de energía generada en la simulación del sistema piezoeléctrico en el software Proteus**

A partir de una muestra de 15 datos registrados de la simulación del sistema en el software Proteus se obtuvieron los siguientes datos, considerando la pisada de una persona:

	Energía inicial(W)	Multiplicador 1(V)	Multiplicador 2(V)	Multiplicador 3(V)	Multiplicador 4(V)	Energía final (W)
1	6.8	41.98	35.75	37.14	38.66	0.89
2	6.88	41.98	35.75	37.14	38.66	0.89
3	4.62	41.01	35.86	36.86	38.38	0.60
4	5.18	41.43	35.47	36.86	38.38	0.68
5	6.41	41.98	35.75	36.99	38.66	0.84
6	6.17	41.98	35.61	36.99	38.52	0.80
7	5.67	41.98	35.61	36.99	38.52	0.74
8	6.54	41.98	35.75	37.14	38.66	0.85
9	6.73	41.98	35.75	37.14	38.66	0.88
10	7.44	42.12	35.89	37.14	38.8	0.97
11	7.31	41.98	35.75	37.14	38.66	0.95
12	7.06	41.98	35.75	37.14	38.66	0.92
13	7.03	41.98	35.75	37.14	38.66	0.92
14	7.99	42.12	35.89	37.14	38.8	0.99
15	7.54	42.12	35.89	37.27	38.8	0.98
PROM	6.62	41.91	35.75	37.08	38.63	0.86

Tabla 12: Energía promedio de la simulación de una pisada en Proteus

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 7

EVALUACIÓN COSTO – BENEFICIO SOBRE EL SISTEMA PIEZOELÉCTRICO

7.1. Caracterización energética de consumo y costos

7.1.1. Datos teóricos basados en Pavegen

A continuación, se observará una tabla con cálculos sobre la cantidad de energía generada analizando 3 escenarios: con 8 pasos, con 12 pasos y con 16 pasos por persona; teniendo en cuenta un total de 9336 personas como flujo diario de personas, 8.575 W por pisada. Para ello se toma como referencia la evaluación realizada en la tabla del ANEXO 2.

Además, se considera que cuando una persona da un paso tarda 0.52 segundos por paso, con una tarifa de S/.0.1515 por kW.h según recibos de la SEAL y una comparación con los datos de Concha Reátegui que considera 8 pasos.

Cantidad de pasos	Con 8 pasos	Con 8 pasos	Con 12 pasos	Con 16 pasos	
	Fuente: Concha Reátegui	Análisis propio	Análisis propio	Análisis propio	
Flujo diario de personas	29413.00	9336.00	9336.00	9336.00	
Total de pasos	8.00	8.00	12.00	16.00	
Watt por paso = 7 y 8.575 W	1647128.00	640449.60	960674.40	1280899.20	
kW generados por día	1647.13	640.45	960.67	1280.90	
kW. h generados al día (0.52s por paso)	96.89	50.80	76.21	101.61	
kW. h generados al mes	2906.70	1219.18	1828.93	2438.69	
kW. h generados al año	35364.85	14630.18	21947.22	29264.25	
	Tarifa s/. 0.1515 por Kw.h; según	184.71	277.08	369.46	Al mes
	SEAL	2216.47	3325.00	4433.53	Al año

Figura 24: Evaluación de cantidad de energía teórica generada considerando 8, 12 y 16 pasos por persona considerando un flujo de 9336 personas al día. Fuente: Elaboración propia.

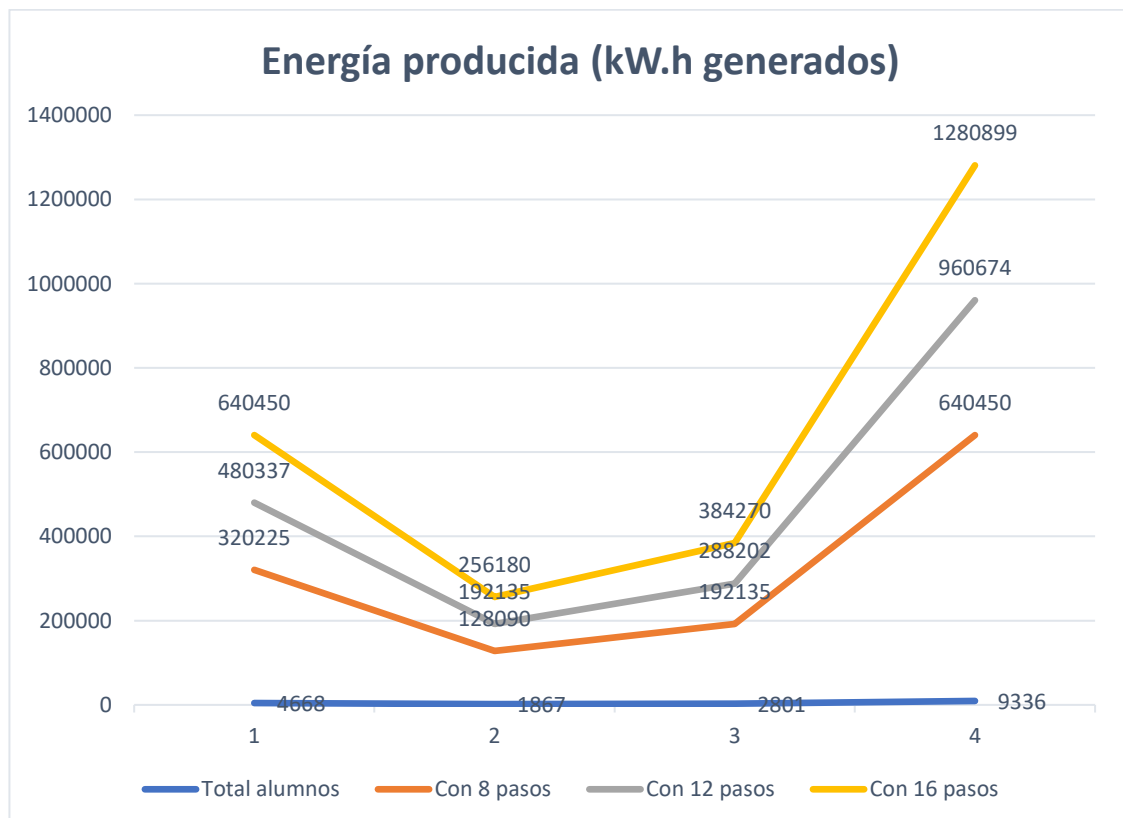
Seguidamente, se definen 3 escenarios para realizar una evaluación de la energía producida en kW.h; los escenarios serán identificados por aulas de 40 alumnos según turnos (mañana, tarde y noche) y con porcentajes de asistencia de 50%, 20% y 30% respectivamente, a partir de un total de 9336 alumnos.

A partir de esto, se calcula la energía producida considerando 8, 12 y 16 pasos por persona como se muestra a continuación:

Escenarios(Aula)						Energía producida (kW.h generados)		
Nº	Porcentaje	Turno	Total alumnos	Total aulas	Descripción	Con 8 pasos	Con 12 pasos	Con 16 pasos
1	50.00%	Mañana	4668	117	Aula con 40 alumnos	320225	480337	640450
2	20.00%	Tarde	1867	47	Aula con 40 alumnos	128090	192135	256180
3	30.00%	Noche	2801	70	Aula con 40 alumnos	192135	288202	384270
Total			9336			640450	960674	1280899

Figura 25: Energía producida a partir de 3 escenarios según turno mañana, tarde y noche. Fuente: Elaboración propia.

Como energía producida en el primer escenario turno mañana (50%), con un total de 4668 alumnos considerando 8 pasos por cada uno se obtiene un total de 640450 kW.h generados, con 12 pasos se obtiene un total de 480337kW.h, con 16 pasos se obtiene un total de 640450 kW.h; en el segundo escenario turno tarde (20%) con un total de 1867 alumnos considerando 8 pasos se obtiene un total de 128090 kW.h, con 12 pasos se obtiene un total de 192135kW.h, con 16 pasos se obtiene un total de 256180 kW.h y en el tercer escenario turno noche (30%) con un total de 2801 alumnos considerando 8 pasos se obtiene un total de 192135 kW.h, con 12 pasos se obtiene un total de 288202 kW.h y con 16 pasos se obtiene un total de 384270 kW.h. Resultando en total 640450 kW.h con 8 pasos, 960674 con 12 pasos y 1280899 kW.h con 16 pasos.



Gráfica 1: Energía producida según escenarios. Fuente: Elaboración propia.

7.1.2. Datos a partir de simulación en Proteus

A continuación, se observarán 3 tablas con cálculos sobre la cantidad de energía generada por el circuito simulado del sistema piezoeléctrico en el software Proteus analizando la energía producida con 8 pasos, con 12 pasos y con 16 pasos por persona.

Para ello, se considera un total de 9336 personas como flujo diario, 0.86 W generados por piezoeléctrico, 9 piezoeléctricos por baldosa y una tarifa de S/.0.1515 por kW.h según recibos de la SEAL.

- **Energía producida con el simulador Proteus considerando 8 pasos (4 baldosas)**

Con 8 pasos	
Energía producida con simulador Proteus	
Flujo diario de personas	9336.00
Total de pasos	8.00
Watt por paso generados al día	578085.12
kW por paso generados al día	578.09
kW.h generados al día	45.85
kW.h generados al mes	1100.46
kW.h generados al año	13205.55
Tarifa s/. 0.1515 por Kw.h; según SEAL	S/2,000.64

Tabla 13: Energía producida con simulador Proteus con 8 pasos.

Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis realizado considerando un flujo diario de personas de 9336 dato referente al alumnado y 8 pasos por cada uno de ellos se obtiene como resultado un total de 578085.12 watt por pasos generados al día, su equivalente 578.09 kW.h generados al día y un total de 13205 kW.h generados al año. A partir de ello, considerando la tarifa por kW.h según

SEAL con dato de valor S/. 0.1515, se obtiene un total de S/. 2000.64 considerando valores de simulación.

- **Energía producida con el simulador Proteus considerando 12 pasos (6 baldosas)**

Con 12 pasos	
Energía producida con simulador Proteus	
Flujo diario de personas	9336.00
Total de pasos	12.00
Watt por paso generados al día	867127.68
kW por paso generados al día	867.13
kW.h generados al día	68.79
kW.h generados al mes	1650.84
kW.h generados al año	19810.08
Tarifa s/. 0.1515 por Kw.h; según SEAL	S/3,001.23

Tabla 14: Energía producida con simulador Proteus con 12 pasos.

Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis realizado considerando un flujo diario de personas de 9336 dato referente al alumnado y 12 pasos por cada uno de ellos se obtiene como resultado un total de 867127.68 watt por pasos generados al día, su equivalente 867.13.kW.h generados al día y un total de 19810.08 kW.h generados al año. A partir de ello, considerando la tarifa por kW.h según SEAL con dato de valor S/. 0.1515, se obtiene un total de S/. 3001.23 considerando valores de simulación.

- **Energía producida con el simulador Proteus considerando 16 pasos (8 baldosas)**

Con 16 pasos	
Energía producida con simulador Proteus	
Flujo diario de personas	9336.00
Total de pasos	16.00
Watt por paso generados al día	1156170.24
kW por paso generados al día	1156.17
kW.h generados al día	91.72
kW.h generados al mes	2201.22
kW.h generados al año	26414.61
Tarifa s/. 0.1515 por Kw.h; según SEAL	S/4,001.81

Tabla 15: Energía producida con simulador Proteus con 16 pasos.

Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis realizado considerando un flujo diario de personas de 9336 dato referente al alumnado y 16 pasos por cada uno de ellos se obtiene como resultado un total de 1156170.24 watt por pasos generados al día, su equivalente 1156.17 kW.h generados al día y un total de 26411.61 kW.h generados al año. A partir de ello, considerando la tarifa por kW.h según SEAL con dato de valor S/. 0.1515, se obtiene un total de S/. 4001.81 considerando valores de simulación.

7.1.3. Análisis de ciclo de vida de baldosas piezoeléctricas

Después de haber hallado y tener definido el número de pasos al año es que se debe calcular el ciclo de vida de las baldosas. Según Agatón y por fuente de

Pavegen señala que las baldosas poseen una vida útil de 200000000 de pisadas, por lo que se formula la siguiente ecuación:

$$\text{Periodo vida útil(años)} = \frac{N_{pvu}}{N_{pa}}$$

Ecuación 2: Periodo de vida útil baldosas en años. Fuente: [2]

$$\text{Periodo vida útil(años)} = \frac{200000000}{37344000}$$

$$\text{Periodo vida útil(años)} = 5.36 \text{ años}$$

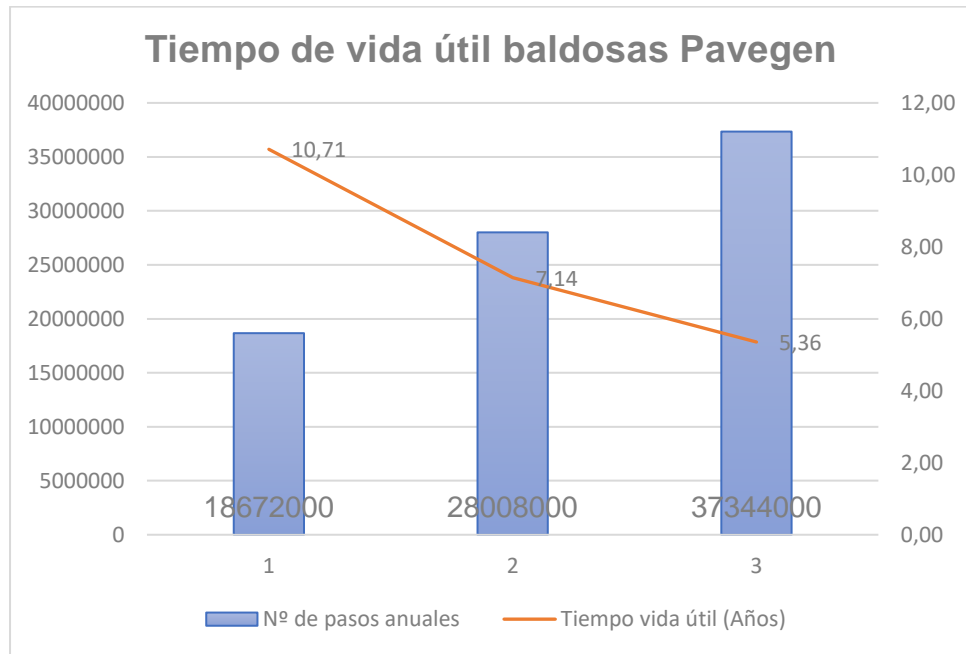
Una vez calculado el periodo de vida útil que es 5.36 años, es pertinente calcular el tiempo de vida de las baldosas considerando la cantidad de pasos estimados por el total de estudiantes que son 9336. Para ello se toman en cuenta 3 escenarios en los que se evalúa la cantidad de pasos por persona 8,12 y 16.

Tiempo de vida útil baldosas Pavegen			
	Con 8 pasos	Con 12 pasos	Con 16 pasos
Nº de pasos diarios	74688	112032	149376
Nº de pasos anuales	18672000	28008000	37344000
Tiempo vida útil (Años)	10.71	7.14	5.36

Tabla 16: Tiempo de vida útil de baldosas Pavegen considerando 8, 12 y 16 pasos por persona. Fuente: Elaboración propia.

De lo cual, se obtiene como resultados un tiempo de vida útil de 10.71 años considerando 8 pasos por persona, 7.14 años con 12 pasos y 5.36 años con 16

pasos; concluyendo que por más pasos dados menos tiempo de vida tendrán las baldosas resultando así inversamente proporcional como se muestra en el siguiente gráfico:



Gráfica 2: Tiempo de vida útil de baldosas Pavegen respecto al número de pasos anuales. Fuente: Elaboración propia.

7.1.4. Análisis suministro eléctrico y energía en hora punta y fuera de hora punta

Para realizar este análisis se tomaron los datos reales de los recibos de suministro de energía eléctrica emitidos por la SEAL (Sociedad Eléctrica del Sur Oeste) correspondientes a los meses desde marzo hasta setiembre del año 2019 de las sedes Avenida Tacna y Arica y Avenida Parra detallándose los montos a continuación:

SUMINISTRO	MES	SERVICIO	SEDE	MONTO
443337	MARZO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	S/.49,285.84
443337	ABRIL	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	S/.56,275.25
486615	ABRIL	SEAL	AV. PARRA	S/.27,639.81
443337	MAYO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	S/.57,013.80
486615	MAYO	SEAL	AV. PARRA	S/.28,314.13
443337	JUNIO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	S/.56,497.19
486615	JUNIO	SEAL	AV. PARRA	S/.28,130.64
443337	JULIO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	S/.56,449.12
486615	JULIO	SEAL	AV. PARRA	S/.28,532.34
443337	AGOSTO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	S/.52,513.96
443337	SETIEMBRE	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	S/.56,781.01
486615	SETIEMBRE	SEAL	AV. PARRA	S/.28,084.96
			PROMEDIO AV. TACNA Y ARICA	S/.56,603.27
			PROMDIO AV. PARRA	S/.28,140.38

Tabla 17: Promedio del monto de suministro de servicio de la SEAL en las sedes de la UTP – sede Arequipa. Fuente: Elaboración propia.

Luego para un mejor análisis se dividen las sedes y se consideran datos de la energía en hora punta y energía fuera de hora punta en kW.h y considerando un precio por kW.h de S/. 0.1515 se genera un monto total mensual y uno promedio.

- **Sede Arequipa – Avenida Parra Nro. 201**

SUMINISTRO	MES	SERVICIO	SEDE	ENERGÍA HORA PUNTA (kW.h)	ENERGÍA FUERA DE PUNTA (kW.h)	MONTO DE ENERGÍA HORA PUNTA Y FUERA DE HORA PUNTA	MONTO TOTAL
486615	ABRIL	SEAL	AV. PARRA NRO. 201	7044.9	25396.6	S/.4,914.89	S/.27,639.81
486615	MAYO	SEAL	AV. PARRA NRO. 201	8218	25517.7	S/.5,110.96	S/.28,314.13
486615	JUNIO	SEAL	AV. PARRA NRO. 201	8516.2	26998.5	S/.5,380.48	S/.28,314.13
486615	JULIO	SEAL	AV. PARRA NRO. 201	8111.3	26177.2	S/.5,194.71	S/.28,532.34
486615	SETIEMBRE	SEAL	AV. PARRA NRO. 201	8469.5	26952.3	S/.5,366.40	S/.28,084.96
						MONTO PROMEDIO TOTAL	S/.28,177.07

Tabla 18: Análisis del monto de energía en hora y fuera de hora punta de la sede Av. Parra. Fuente: Elaboración propia.

- **Sede Arequipa – Avenida Tacna y Arica**

SUMINISTRO	MES	SERVICIO	SEDE	ENERGÍA HORA PUNTA (kW.h)	ENERGÍA FUERA DE PUNTA (kW.h)	MONTO DE ENERGÍA HORA PUNTA Y FUERA DE HORA PUNTA	MONTO TOTAL
443337	MARZO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	23232.8	73590.9	S/.14,668.79	S/.49,285.84
443337	ABRIL	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	29871.6	89959.8	S/.18,154.46	S/.56,275.25
443337	MAYO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	31680.9	93602.2	S/.18,980.39	S/.57,013.80
443337	JUNIO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	31618.5	93940.2	S/.19,022.14	S/.56,497.19
443337	JULIO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	30145.5	92338	S/.18,556.25	S/.56,449.12
443337	AGOSTO	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	25911.4	83530.7	S/.16,580.48	S/.52,513.96
443337	SEPTIEMBRE	SEAL	AV. TACNA Y ARICA	31624.6	94094.1	S/.19,046.38	S/.56,781.01
						MONTO PROMEDIO TOTAL	S/.54,973.74

Tabla 19: Análisis del monto de energía en hora y fuera de hora punta de la sede Av. Tacna y Arica. Fuente: Elaboración propia.

Concluyendo se obtiene un monto total promedio de S/. 28,177.07 por la energía en hora punta y fuera de hora punta en la sede Av. Parra N° 201 y monto total promedio de S/.54,973.74 por la energía en hora y fuera de hora punta para la sede Av. Tacna y Arica.

7.2. Realizar una comparativa con empresa Pavegen

Para esto se consideró la energía teórica producida con baldosas Pavegen en el cual se considera una energía de 8.575 W por paso calculados de manera teórica y la energía producida en la simulación del circuito realizado en el software Proteus en el cual la energía producida de 1 piezoeléctrico es un promedio de 0.86 W y ya que consideraremos 9 piezoeléctricos por baldosa la energía que resulta es de 0.774 mW equivalente a 7.74 W.

Consideraciones		Energía teórica producida con Pavegen (kW.h)	Energía producida con simulador Proteus (kW.h)
Flujo diario de personas		9336.00	9336.00
Con 8 pasos	Por día	50.80	45.85
	Por mes	1219.20	1100.46
	Por año	14630.40	13205.55
Con 12 pasos	Por día	76.21	68.79
	Por mes	1829.04	1650.84
	Por año	21948.48	19810.08
Con 16 pasos	Por día	101.61	91.72
	Por mes	2438.64	2201.22
	Por año	29263.68	26414.61

Tabla 20: Comparativa de energía teórica producida por Pavegen y energía producida con simulador Proteus. Fuente: Elaboración propia.

Después de haber realizado la comparativa se obtiene una diferencia de 13205.55, 19810.08 y 26414.61 kW.h por año considerando 8, 12 y 16 pasos por persona respectivamente.

7.3. Evaluación costo - beneficio de implementación del sistema piezoeléctrico

Se realiza una evaluación costo- beneficio por medio de indicadores financieros para confirmar su viabilidad. Para dicha evaluación se tendrá en cuenta el valor inicial de la inversión del prototipo mediante un presupuesto de materiales y mano de obra; y costos de mantenimiento.

7.3.1. Inversión

Para la implementación de la presente investigación se deben incurrir en una inversión para ello se realiza un presupuesto de materiales necesarios considerados como la inversión para el prototipo de baldosa piezoeléctrica

- **Inversión de prototipo - presupuesto de materiales considerando 4 baldosas piezoeléctricas**

Para 4 baldosas				
Presupuesto de materiales - Inversión prototipo				
Item	Material	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
1	Transductor piezoeléctrico	36	S/1.50	S/54.00
2	Diodo 1N4007	20	S/0.30	S/6.00
5	Diodo SC - schottky	16	S/0.30	S/4.80
6	Capacitor no electrolítico - CAP	24	S/1.50	S/36.00
7	Resistor	16	S/1.50	S/24.00
8	Relay	4	S/15.00	S/60.00
9	Cable	4	S/1.00	S/4.00
10	Batería	1	S/11,404.80	S/11,404.80
11	Baldosa de concreto	4	S/40.00	S/160.00
12	Fuente de alimentación	4	S/60.00	S/240.00
13	Multímetro	1	S/95.00	S/95.00
14	Placa para circuito	4	S/50.00	S/200.00
Total material (S/.)				S/12,288.60
Mano de obra				
15	Mano de obra	4	S/100.00	S/400.00
Total mano de obra (S/.)				S/400.00
Inversión Total (S/.)				S/12,688.60

Tabla 21: Inversión de prototipo de sistema piezoeléctrico con 4 baldosas.

Fuente: Elaboración propia.

- **Inversión de prototipo - presupuesto de materiales considerando 6 baldosas piezoeléctricas**

Presupuesto de materiales - Inversión prototipo				
Item	Material	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
1	Transductor piezoeléctrico	54	S/1.50	S/81.00
2	Diodo 1N4007	30	S/0.30	S/9.00
5	Diodo SC - schottky	24	S/0.30	S/7.20
6	Capacitor no electrolítico - CAP	36	S/1.50	S/54.00
7	Resistor	24	S/1.50	S/36.00
8	Relay	6	S/15.00	S/90.00
9	Cable	6	S/1.00	S/6.00
10	Batería	1	S/11,404.80	S/11,404.80
11	Baldosa de concreto	6	S/40.00	S/240.00
12	Fuente de alimentación	6	S/80.00	S/480.00
13	Multímetro	1	S/95.00	S/95.00
14	Placa para circuito	6	S/50.00	S/300.00
Total material (S/.)				S/12,803.00
Mano de obra				
15	Mano de obra	6	S/100.00	S/600.00
Total mano de obra (S/.)				S/600.00
Inversión Total (S/.)				S/13,403.00

Tabla 22: Inversión de prototipo de sistema piezoeléctrico con 6 baldosas.

Fuente: Elaboración propia.

- **Inversión de prototipo - presupuesto de materiales considerando 8 baldosas piezoeléctricas**

Presupuesto de materiales - Inversión prototipo				
Item	Material	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
1	Transductor piezoeléctrico	72	S/1.50	S/108.00
2	Diodo 1N4007	40	S/0.30	S/12.00
5	Diodo SC - schottky	16	S/0.30	S/4.80
6	Capacitor no electrolítico - CAP	24	S/1.50	S/36.00
7	Resistor	16	S/1.50	S/24.00
8	Relay	8	S/15.00	S/120.00
9	Cable	8	S/1.00	S/8.00
10	Batería	1	S/11,404.80	S/11,404.80
11	Baldosa de concreto	8	S/40.00	S/320.00
12	Fuente de alimentación	8	S/80.00	S/640.00
13	Multímetro	1	S/95.00	S/95.00
14	Placa para circuito	8	S/50.00	S/400.00
Total material (S/.)				S/13,172.60
Mano de obra				
15	Mano de obra	8	S/100.00	S/800.00
Total mano de obra (S/.)				S/800.00
Inversión Total (S/.)				S/13,972.60

Tabla 23: Inversión de prototipo de sistema piezoeléctrico con 8 baldosas.

Fuente: Elaboración propia.

7.3.2. Costos de mantenimiento

El presente costo pertenece al mantenimiento que deberán tener las baldosas de manera mensual para su óptimo funcionamiento, considerándose un total de 240 por baldosa, tal como se muestra a continuación:

- **Costo de mantenimiento considerando 4 baldosas**

Costo de mantenimiento					
Item	Concepto	Cantidad	N° Veces	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
1	Mantenimiento preventivo	4	2	50	S/400.00
Total costos operación y mantenimiento					S/400.00

Tabla 24: Costo de mantenimiento considerando 4 baldosas.

Fuente: Elaboración propia.

- **Costo de mantenimiento considerando 6 baldosas**

Costo de mantenimiento					
Item	Concepto	Cantidad	N° Veces	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
1	Mantenimiento preventivo	6	2	50	S/600.00
Total costos operación y mantenimiento					S/600.00

Tabla 25: Costo de mantenimiento considerando 6 baldosas.

Fuente: Elaboración propia

- **Costo de mantenimiento considerando 8 baldosas**

Costo de mantenimiento					
Item	Concepto	Cantidad	N° Veces	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
1	Mantenimiento preventivo	8	2	50	S/800.00
Total costos operación y mantenimiento					S/800.00

Tabla 26: Costo de mantenimiento considerando 8 baldosas.

Fuente: Elaboración propia.

7.3.3. Beneficio por ahorro aparente

Si se tiene en cuenta el uso del prototipo del sistema piezoeléctrico, el ahorro que generaría el sistema es de un promedio de 3,67%, 5,50% y 7,33%, teniendo como referencia un total de 9936 personas en 3 diferentes escenarios (con 8, 12 y con 16 pasos respectivamente). El análisis se muestra a continuación:

- **Ahorro aparente con 8 pasos (4 baldosas)**

Ahorro aparente con 8 pasos			
Mes	Monto total energía generada (S/.)	Valor energía con prototipo (S/.)	Ahorro en porcentaje
Marzo	S/49,285.84	S/2,000.64	4.06%
Abril	S/56,275.25	S/2,000.64	3.56%
Mayo	S/57,013.80	S/2,000.64	3.51%
Junio	S/56,497.19	S/2,000.64	3.54%
Julio	S/56,449.12	S/2,000.64	3.54%
Agosto	S/52,513.96	S/2,000.64	3.81%
Septiembre	S/56,781.01	S/2,000.64	3.52%
		Promedio	3.65%

Tabla 27: Ahorro aparente con 8 pasos. Fuente: Elaboración propia.

- **Ahorro aparente con 12 pasos (6 baldosas)**

Ahorro aparente con 12 pasos			
Mes	Monto total energía generada (S/.)	Valor energía con prototipo (S/.)	Ahorro en porcentaje
Marzo	S/49,285.84	S/3,001.23	6.09%
Abril	S/56,275.25	S/3,001.23	5.33%
Mayo	S/57,013.80	S/3,001.23	5.26%
Junio	S/56,497.19	S/3,001.23	5.31%
Julio	S/56,449.12	S/3,001.23	5.32%
Agosto	S/52,513.96	S/3,001.23	5.72%
Septiembre	S/56,781.01	S/3,001.23	5.29%
		Promedio	5.47%

Tabla 28: Ahorro aparente con 12 pasos. Fuente: Elaboración propia.

- **Ahorro aparente con 16 pasos (8 baldosas)**

Ahorro aparente con 16 pasos			
Mes	Monto total energía generada (S/.)	Valor energía con prototipo (S/.)	Ahorro en porcentaje
Marzo	S/49,285.84	S/4,001.81	8.12%
Abril	S/56,275.25	S/4,001.81	7.11%
Mayo	S/57,013.80	S/4,001.81	7.02%
Junio	S/56,497.19	S/4,001.81	7.08%
Julio	S/56,449.12	S/4,001.81	7.09%
Agosto	S/52,513.96	S/4,001.81	7.62%
Septiembre	S/56,781.01	S/4,001.81	7.05%
		Promedio	7.30%

Tabla 29: Ahorro aparente con 16 pasos. Fuente: Elaboración propia.

7.3.4. Flujo de caja incremental

Para el cálculo del flujo de caja con la implementación del proyecto, se toma en cuenta los datos de la inversión inicial, costo de mantenimiento y los ingresos por producción de energía.

Cabe resaltar que la proyección se realiza teniendo en cuenta el ciclo de vida del sistema piezoeléctrico en los 3 escenarios (con 8 pasos, con 12 pasos y con 16 pasos) a los que corresponde 10.71, 7.14 y 5.36 años respectivamente según evaluación.

RUBROS	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11
I. MÓDULO DE INVERSIÓN	-S/12,688.60	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00
Inversión prototipo	-S/12,688.60										
II. MÓDULO DE OPERACIÓN	S/4,001.28	S/3,901.38	S/4,096.44	S/4,301.27	S/4,516.33	S/4,742.15	S/4,979.25	S/5,228.22	S/5,489.63	S/5,764.11	S/6,052.31
A INGRESOS INCREMENTALES	S/2,000.64	S/2,200.70	S/2,310.74	S/2,426.28	S/2,547.59	S/2,674.97	S/2,808.72	S/2,949.15	S/3,096.61	S/3,251.44	S/3,414.01
(a) Ingresos con proyecto	S/2,000.64	S/2,200.70	S/2,310.74	S/2,426.28	S/2,547.59	S/2,674.97	S/2,808.72	S/2,949.15	S/3,096.61	S/3,251.44	S/3,414.01
Ingresos por producción de energía	S/2,000.64	S/2,200.70	S/2,310.74	S/2,426.28	S/2,547.59	S/2,674.97	S/2,808.72	S/2,949.15	S/3,096.61	S/3,251.44	S/3,414.01
(b) Ingresos sin proyecto	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00	S/0.00
Otro tipo de tecnología											
B. EGRESOS OPERATIVOS INCREMENTALES	-S/2,000.64	-S/1,700.67	-S/1,785.71	-S/1,874.99	-S/1,968.74	-S/2,067.18	-S/2,170.54	-S/2,279.06	-S/2,393.02	-S/2,512.67	-S/2,638.30
(c) Costos y gastos operativos con proyecto	S/52,972.37	S/56,020.99	S/58,822.04	S/61,763.14	S/64,851.30	S/68,093.86	S/71,498.55	S/75,073.48	S/78,827.16	S/82,768.51	S/86,906.94
Energía eléctrica	S/52,972.37	S/55,620.99	S/58,402.04	S/61,322.14	S/64,388.25	S/67,607.66	S/70,988.04	S/74,537.44	S/78,264.32	S/82,177.53	S/86,286.41
Mantenimiento		S/400.00	S/420.00	S/441.00	S/463.05	S/486.20	S/510.51	S/536.04	S/562.84	S/590.98	S/620.53
(d) Costos y gastos operativos sin proyecto	S/54,973.01	S/57,721.66	S/60,607.74	S/63,638.13	S/66,820.04	S/70,161.04	S/73,669.09	S/77,352.55	S/81,220.17	S/85,281.18	S/89,545.24
Energía eléctrica (SEAL)	S/54,973.01	S/57,721.66	S/60,607.74	S/63,638.13	S/66,820.04	S/70,161.04	S/73,669.09	S/77,352.55	S/81,220.17	S/85,281.18	S/89,545.24
FLUJO DE CAJA NOMINAL (I + II)	-S/8,687.32	S/3,901.38	S/4,096.44	S/4,301.27	S/4,516.33	S/4,742.15	S/4,979.25	S/5,228.22	S/5,489.63	S/5,764.11	S/6,052.31
FLUJO DE CAJA ACUMULADO	-S/8,687.32	-S/4,785.94	-S/689.50	S/3,611.77	S/8,128.10	S/12,870.25	S/17,849.50	S/23,077.72	S/28,567.34	S/34,331.45	S/40,383.77
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	S/39,585.38										
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	45%										
TASA DE INTERÉS MÍNIMA	15%										
PERIODO DE RECUPERACIÓN	3 años										
B/C	S/5.56										

Tabla 30: Flujo de caja incremental teórico. Fuente: Elaboración propia.

De la evaluación del flujo de caja incremental obtenemos el valor actual neto (VAN) de S/. 39,585.38; una tasa interna de retorno (TIR) de 45% y un periodo de recuperación de 13 años. Asimismo, se obtuvo un beneficio costo de S/.5.56 por cada S/.1.00 a invertir.

CONCLUSIONES

8.1. Conclusiones

- Para el diseño del sistema piezoeléctrico se consideraron las etapas de transducción, rectificación, acondicionamiento y almacenamiento. Para las baldosas el tipo de material que cumplió los criterios de evaluación (rigidez, resistencia a la abrasión, resistencia al deterioro ambiental, facilidad de instalación, peso) son las baldosas de concreto con 4,3 puntos. El material piezoeléctrico elegido es del tipo PZT (zirconato titanato de plomo), de los cuales se consideran 9 por baldosa. Además de super capacitores, puente de diodos (1N4007, Schottky B2100-13 y 6tQ045), inductores, transistores (MOSFET – 2N6796) y batería de litio para almacenamiento (LG RESU 3.3 48V).
- En la simulación del sistema piezoeléctrico mediante el software Proteus se establecieron valores para la simulación como: 9336 estudiantes de la UTP –sede Arequipa, 70Kg como peso promedio, 0.52 como valor de tiempo por pisada. Considerando 15 datos registrados en la simulación del sistema piezoeléctrico se obtuvieron en promedio los siguientes valores por pisada: energía inicial (6.62 W), multiplicador 2 (35.75 V), multiplicador 3 (37.08 V), multiplicador 4 (38.63 V) y energía final producida por pisada (0.86 W). De manera que considerando 9 piezoeléctricos se obtiene un total de 7.74 W por pisada según simulación.

- La evaluación de costo - beneficio del sistema piezoeléctrico considerando un ciclo de vida de las baldosas de 11 años, arrojó un valor actual neto (VAN) de S/. 39,585.38 y una tasa interna de retorno (TIR) de 45% lo que nos indica que el periodo de recuperación es de 3 años. Asimismo, se obtuvo un beneficio costo de S/.5.56 por cada S/.1.00 a invertir, demostrando que este trabajo de investigación resulta ser viable.
- Los costos energéticos en la UTP – sede Arequipa aplicando simulación se vieron reducidos en 3.65% considerando el peor escenario en el que se consideran 8 pasos por persona con 4 baldosas.

8.2. Discusión

- En la comparativa realizada con la empresa Pavegen, con respecto a la generación de energía de las baldosas Pavegen éstas producen alrededor de 7 W por pisada, de manera teórica se obtuvo un total de 8.575 W por pisada y con la simulación del sistema piezoeléctrico diseñado se obtuvo como promedio considerando 1 piezoeléctrico 0,86 W por pisada y al considerar 9 piezoeléctricos se obtuvo 7.74W por pisada, valor semejante al de las baldosas Pavegen, validando así el funcionamiento de la tecnología piezoeléctrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. J. Jiménez Martínez, D. A. Jose de frutos y M. Vásquez, «Optimización de piezoeléctricos comerciales para su uso en sistemas de Energy Harvesting,» *Elsevier*, 2015.
- [2] F. J. Agatón Aguirre, *Análisis de la factibilidad económica y ambiental de utilizar baldosas piezoeléctricas en el campus de la Universidad militar Nueva Granada (UMNG)*, Nueva Granada: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2015.
- [3] Instituto Nacional de Estadística e Informática, *Producción de energía eléctrica y consumo de cemento al alza*, 2019.
- [4] Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional, *Proyección de crecimiento de consumo de energía*, COES, 2019.
- [5] A. Ríos Villacorta, *Futuro de la Energía en Perú: Estrategias energéticas sostenibles*, International Rivers, 2016.
- [6] A. Mohamed Elhalwagy, «Feasibility Study for Using Piezoelectric Energy Harvesting Floor in Building's Interior Spaces,» *Elsevier*, 10 Julio 2017.
- [7] M. Casanova Gómez, *Sistemas de cosecha de energía para sistemas electrónicos autónomos*, Universidad Rey Juan Carlos, 2015, p. 7.

- [8] S. E. Gonzales Palacios, *EnergyMove: diseño de un dispositivo piezoeléctrico para harvesting de energía humana*, 2012.
- [9] E. Sepúlveda Orozco, *Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico(Energy Harvesting) mediante optimización topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar*, Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [10] J. Suna, C. Song Hee, C. Yunhee y J. Chan Hyeon, *Harvesting energy from low frequency vibration using MSMA/MFC laminate composite*, Barcelona, 2013.
- [11] A. Arnau Vives, *Piezoelectric transducers and applications*, New York: Springer, 2008.
- [12] Á. Gómez Molina, *Diseño de un sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos*, Universidad de Alcalá, 2018.
- [13] K. Palomino Vera , *Prototipo generador de energía eléctrica por el uso de una bicicleta elíptica para la iluminación de un ambiente de deporte*, Lima: Universidad Tecnológica del Perú, 2019.
- [14] A. Morales Espitia y J. Contreras Calderón, *Análisis de convenienci de la implementación de la energía piezoeléctrica en las salas de cine Colombia en la ciudad de Bogotá*, Bogotá: Universidad distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [15] R. Concha Reátegui, *Proyecto de viabilidad para implementar un sistema de generación de energía renovable en las estaciones de la línea 1 del tren eléctrico de Lima*, Lima: Universidad peruana de ciencias aplicadas, 2019.
- [16] O. Gallardo Puertas, *Fabricación de placas de cirucito impreso con Proteus*, U. d. Valladolid, Ed., Valladolid, 2015.

- [17] V. Rossano, *PROTEUS VSM: Manuales Users*, Mexico: Creative Andina Corp, 2013.
- [18] Labcenter Electronics, *Proteus design suite*, California: Labcenter Electronics Ltd., 2019.
- [19] F. A. Jiménez Rubio, *Análisis del estado actual de la tecnología Energy Harvesting(Recolectores de energía) basados en piezoelectricidad*, Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2018.
- [20] D. Shen, *Piezoelectric energy harvesting devices for low frequency vibration applications*, 2009.
- [21] J. A. Cifuetes Gutiérrez y D. F. López Montes, *Baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético*, Antioquía, 2013.
- [22] S. Caller Guzmán y C. Mallma Trinidad, *Diseño de un sistema de energy harvesting para la recuperación de energía en la industria*, Lima: Universidad Tecnológica del Perú, 2019.
- [23] Carrod Electrónica Online S., *Diodo 1N4007 Rectificador 1000V 1A*.
- [24] Diodes Incorporated, *Diode B270 - B2100*, Mouser Electronics, 2018.
- [25] Vishay Semiconductors, *High performance Schottky Rectifier, 6A*, 2017.
- [26] Mecatrónica LATAM, *Inductor*.
- [27] V. García, *El Transistor MOSFET*, Electrónica Práctica Aplicada, 2012.
- [28] S. Ellena y P. Chauveau, *Tecnologías de almacenamiento de energía y factibilidad en Chile*, Pontificia Universidad Católica de Chile.

- [29] TECNOSOL, *Batería Litio LG RESU 3.3 48V*, Tecnología Solar e Hidráulica S.L..
- [30] A. Fernández , M. Restrepo y T. Torres, *Diseño de un sistema sostenible de generación de energía, aprovechando el efecto piezoeléctrico en la PUJ Cali*, Cali: Pontificia Uuniversidad Javeriana , 2017.
- [31] J. Nilsson y A. Thorstensson, «Ground reaction forces at different speeds of human walking and running.,» *Acta Physiologica Scandinavica*, 1989.
- [32] LINEAR TECHNOLOGY, *LTC3588-1*, Linear Technology Crporation , 2010.
- [33] Y. T. Sánchez Cáceres, *Circuito multiplicador de voltaje*, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, 2016.